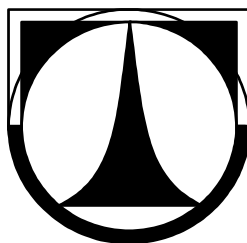


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**



**Disertační práce**

**Rozměrové změny matric PP s nanoplnivem**

**2008**

**Ing. Petr Weinlich**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Obor 23-03V Strojírenská technologie

zaměření  
Tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Rozměrové změny matric PP s nanoplnivem**

**Shrinkage of nanocomposites with PP matrix**

Ing. Petr Weinlich

Školitel: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 164

Počet obrázků: 109

Počet tabulek: 31

Počet příloh: 3

## Anotace

### *Téma práce:*

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou vlivu technologických podmínek vstřikování na výrobní smrštění výstřiků z nanokompozitů s termoplastickou matricí. Jako základní termoplastická matrice je použit polypropylén a to jak v podobě homopolymeru, tak i blokového kopolymeru, do kterých jsou přidány v určitých hmotnostních koncentracích nanočástice. Oba uvedené materiály se používají pro výrobu dílů v automobilovém průmyslu. V experimentální části je na vstřikovaných zkušebních tělesech tvaru desky hodnocen vliv procenta nanočástic, tloušťky stěny, teploty taveniny a teploty formy na výrobní smrštění. Pro materiály a vybrané podmínky vstřikování byla provedena numerická simulace procesu vstřikování zkušebních těles a odhad výrobního smrštění s využitím specializovaného programu Cadmould. Výsledky experimentálně získané byly porovnány s výsledky získanými pomocí numerické simulace.

Závěry disertační práce poskytují informace o výrobním smrštění zvolených materiálů a lze je použít při odhadu výsledného smrštění technického dílce při výrobě formy.

*Klíčová slova:* polypropylén, vstřikování, smrštění, nanokompozity.

## Annotation

### *Theme of presented work:*

Referred thesis is engaged in influence of moulding process technological parameters on production shrinkage for parts made from nanocomposites with thermoplastical matrix. Like basic thermoplastical matrix is used polypropylene namely both like homopolymer and also like block copolymer into which are added nanoparticles with certain weight concentrations. Both used materials are using for production parts in automotive industry. In experimental part is for injected testing samples with the plate shape evaluated influence of nanoparticles percentage, wall thickness, melt temperature and temperature of mould on production shrinkage. For materials and chosen conditions of injection was carried out numerical simulation for injection process of tested samples and estimation of production shrinkage by means of specialized software Cadmould. Results from experimental part were compared with results obtained by numerical simulation.

Conclusions from thesis provides information about production shrinkage of chosen materials and it is possible to use them for final shrinkage estimation of technical products during mould production.

*Keywords:* polypropylene, injection molding, shrinkage, nanocomposites.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce.

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.

Datum / Date: 8.6.2008

Podpis / Signature :



### Poděkování:

Děkuji všem, kteří mi poskytovali cenné rady a připomínky při vypracování mé disertační práce, zejména pak mému školiteli doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi a všem členům katedry strojírenské technologie.

Dále bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a podporu během celého mého doktorského studia.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
1. ÚVOD.....	12
1.1 Současný stav výzkumu nanokompozitů.....	12
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	15
2.1 Smrštění výstřiků z termoplastů.....	15
2.2 Polypropylén – semikrystalický plast pro vstřikování.....	17
2.3 Kompozity a nanokompozity.....	22
2.3.1 Montmorillonit.....	24
2.3.2 Typy nanokompozitních systémů.....	24
2.3.3 Způsoby přípravy polymer/jíl .....	25
2.3.3.1 Polymerace In-situ.....	25
2.3.3.2 Roztoková polymerace.....	25
2.3.3.3 Organofilizace.....	26
2.3.3.4 Kompoundace.....	27
2.3.3.5 Metoda SOL-GEL.....	28
2.4 Fyzikální vlivy na smrštění výstřiků z termoplastů.....	29
2.4.1 Tok polymerních tavenin.....	29
2.4.2 Morfologie polymerů.....	31
2.4.3 Konformace řetězců.....	33
2.4.4 Přechodové teploty.....	33
2.4.5 Orientace makromolekul.....	34
2.4.6 Reologické vlastnosti termoplastů.....	36
2.4.6.1 Kelvinův model.....	37
2.4.6.2 Maxwellův model a relaxační pokus.....	38
2.4.6.3 Tuckertův model.....	39
2.4.6.4 Relaxační a retardační spektrum.....	40
2.4.7 Obsah plniv.....	41
2.4.8 Krystalizace.....	43
2.4.9 Vnitřní pnutí.....	45
2.5 Fyzikální popis procesu vstřikování termoplastů.....	48
2.5.1 Vliv technologických parametrů vstřikování na smrštění.....	52
2.5.2 Vliv vstřikovacího tlaku.....	52
2.5.3 Vstřikovací rychlost.....	54
2.5.4 Dotlak a čas dotlaku.....	54
2.5.5 Teplota formy.....	56
2.5.6 Teplota taveniny.....	58



2.5.7	Tloušťka stěny.....	59
2.5.8	Tvar výrobku.....	60
2.5.9	Vtok a vtokové kanály.....	61
2.6	Analýza procesu vstřikování z hlediska výpočtu smrštění.....	61
2.6.1	Diagramy p-v-T.....	64
2.6.2	Počítačová simulace.....	66
2.6.2.1	Software Cadmould.....	67
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	72
3.1	Záměr experimentálních prací.....	72
3.2	Charakteristika zkoušených materiálů.....	73
3.2.1	Polypropylén.....	73
3.2.2	Nanoblend 1201.....	74
3.3	Vstřikovací stroj a nástroj.....	76
3.4	Volba parametrů experiment.....	79
3.4.1	Materiálové parametry.....	79
3.4.2	Konstrukční parametry.....	80
3.4.3	Technologické parametry.....	80
3.5	Stanovení smrštění výstřiků.....	84
3.5.1	Stanovení výrobního smrštění.....	85
3.5.2	Stanovení dodatečného smrštění.....	85
3.5.3	Stanovení celkového smrštění.....	86
3.6	Měření výrobního smrštění.....	87
3.6.1	Statistické vyhodnocení naměřených dat.....	88
4.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	90
4.1	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 005 + Nanoblend 1201.....	91
4.1.1	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201.....	91
4.1.2	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201.....	95
4.1.3	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201.....	99
4.1.4	Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál Mosten GB 005 + Nanoblend 1201.....	103
4.1.5	Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten GB 005 + Nanoblend 1201.....	104
4.2	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 506 + Nanoblend 1201.....	107
4.2.1	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP	



	Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201.....	107
4.2.2	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP	
	Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201.....	111
4.2.3	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP	
	Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201.....	115
4.2.4	Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál	
	Mosten GB 506 + Nanoblend 1201.....	119
4.2.5	Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten	
	GB 506 + Nanoblend 1201.....	119
4.3	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu	
	Mosten GB 005.....	121
4.3.1	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP	
	Mosten GB 005.....	122
4.3.2	Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál	
	Mosten GB 005.....	127
4.3.3	Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten GB 005.....	127
4.4	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu	
	Mosten GB 506 .....	128
4.4.1	Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP	
	Mosten GB 506.....	128
4.4.2	Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál	
	Mosten GB 506.....	132
4.4.3	Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten GB 506.....	132
4.5	Počítačová simulace.....	134
4.5.1	Postup při výpočtu softwarové simulace.....	134
4.5.2	Materiálová data pro simulaci.....	135
4.5.3	Výsledky počítačové simulace.....	139
5.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	148
5.1	Vliv parametrů vstřikování na výrobní smrštění výstřiků	
	z materiálu Mosten GB 005 + Nanoblend 1201.....	149
5.2	Vliv parametrů vstřikování na výrobní smrštění výstřiků	
	z materiálu Mosten GB 506 + Nanoblend 1201.....	152
5.3	Zhodnocení výsledků softwarové simulace.....	155
6.	ZÁVĚR.....	156
7.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	159
8.	SEZNAM PUBLIKACÍ.....	162
9.	SEZNAM PŘÍLOH.....	164

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\alpha$	hladina významnosti statistického testu
$\Delta v$	rozdíl měrného objemu v diagramu $p$ - $v$ - $T$ [ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení [%]
$\varepsilon_r$	tažnost [%]
$\Phi$	konstanta mocninového zákona - koeficient tekutosti [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\gamma$	smyková deformace [1]
$\gamma_0$	počáteční smyková deformace v čase $t=0$ [1]
$\gamma_{píst}$	smyková deformace pístu reologického modelu [1]
$\gamma_{pruž}$	smyková deformace pružiny reologického modelu [1]
$\gamma_\infty$	limitní rovnovážná hodnota smykové deformace v čase $t \gg \theta$ [1]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\eta_n$	konstantní viskozita v oblasti nízkých smykových rychlostí [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta_{zd}$	zdánlivá viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta$	dynamická viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta_\infty$	viskozita při nekonečném smyku [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\pi, \omega, R'$	parametry Van der Waalsovy stavové rovnice
$\theta$	relaxační doba - Maxwellův model [s]
$\theta$	retardační doba - Kelvinův model [s]
$\theta_i$	relaxační doba $i$ -tého prvku Maxwelllova generalizovaného modelu [s]
$\theta_i$	retardační doba $i$ -tého prvku Kelvinova generalizovaného modelu [s]
$\sigma$	směrodatná odchylka [1]
$\tau$	smykové napětí [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ], [Pa]
$\tau_0$	počáteční smykové napětí v čase $t=0$ [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\tau_{píst}$	smykové napětí pístu reologického modelu [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\tau_{pruž}$	smykové napětí pružiny reologického modelu [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$A$	označení tvarové dutiny formy
$b$	šířka zkušebního tělesa v místě vrubu [mm]
$b_c$	šířka ve středu tvarové dutiny [mm]
$b_i$	materiálové konstanty
$b_l$	šířka zkušebního tělesa [mm]

$b_2$	šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]
$B$	označení tvarové dutiny formy
$D$	gradient rychlostí [ $s^{-1}$ ]
$F$	Fischerovo kritérium [1]
$f(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) retardačních dob Kelvinova generalizovaného modelu
$G$	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$g(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) relaxačních dob Maxwelllova generalizovaného modelu
$G_e$	modul pružnosti ve smyku připojené pružiny Maxwelllova generalizovaného modelu [Pa]
$G_i$	modul pružnosti ve smyku $i$ -tého prvku Maxwelllova generalizovaného modelu [Pa]
$J_0$	poddajnost pružiny v Kelvinově modelu [ $Pa^{-1}$ ]
$J_i$	poddajnost $i$ -tého prvku Kelvinova modelu [ $Pa^{-1}$ ]
$l_c$	délka ve středu tvarové dutiny [mm]
$l_1$	délka zkušebního tělesa [mm]
$l_2$	délka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]
$\log E$	logaritmus modulu pružnosti [Pa]
$m$	hmotnost výstřiku [g]
$N$	hmotnostní procento nanočástic
$n, m$	konstanty (součinitele) mocninového zákona - index toku
$n_s$	otáčky šneku [ $min^{-1}$ ]
$p$	tlak [MPa], [Pa]
$p_d$	dotlak [MPa]
$PF_i$	výpočtové koeficienty programu Cadmould
$PK_i$	výpočtové koeficienty programu Cadmould
$PS_i$	výpočtové koeficienty programu Cadmould
$p_v$	vstřikovací tlak [MPa]
$p_{zp}$	zpětný tlak [MPa]
$p-v-T$	tlak–měrný objem–teplota (diagramy $p-v-T$ )
$p\text{-Value}$	modifikovaná hodnota testového kritéria
$S_L$	lineární (délkové) smrštění [%]
$S_M$	výrobní smrštění [%]
$S_{Mn}$	výrobní smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
$S_{Mp}$	výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
$S_P$	dodatečné smrštění [%]
$S_{Pn}$	dodatečné smrštění ve směru kolmém na směr toku

	taveniny [%]
$S_{PP}$	dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
$S_T$	celkové smrštění [%]
$S_{Tn}$	celkové smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
$S_{Tp}$	celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
$S_V$	objemové smrštění [%]
$t$	čas [s], [h]
$T$	teplota [°C], [K]
$t_{0,5}$	poločas krystalizace [s]
$t_d$	doba dotlaku (doba doplňování dutiny formy) [s]
$T_f$	teplota formy [°C]
$T_f$	teplota viskózního toku [°C]
$T_g$	teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) [°C]
$t_{ch}$	doba chlazení [s]
$T_k$	teploty jednotlivých pásem tavicí komory [°C]
$T_m$	teplota tání krystalitů [°C]
$t_m$	doba manipulace [s]
$T_{m1}, T_{m2}$	teploty temperačního média obou částí formy [°C]
$T_p$	doba plastikace [s]
$t_S$	doba zatuhnutí vtoku [s]
$T_t$	teplota taveniny při výstupu z trysky [°C]
$T_{tr}$	teplota trysky [°C]
$t_v$	doba plnění formy (doba vstřiku) [s]
$v$	měrný objem [cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ], [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]
$v_0, B, C, v_r$	parametry Taitovy stavové rovnice
$v_C$	měrný objem výstřiku v bodě C v p-v-T diagramu [cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ]
$v_E$	měrný objem výstřiku v bodě E v p-v-T diagramu [cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ]
$V_f$	objem dutiny formy při 23°C [cm <sup>3</sup> ]
$V_v$	objem výstřiku při 23°C [cm <sup>3</sup> ]
$V_E$	objem výstřiku v bodě E v p-v-T diagramu [cm <sup>3</sup> ]
ABS	akrylonitril-butadién-styrén
ANOVA	analýza rozptylu
HDPE	vysokohustotní polyetylén
MMT	montmorillonit
PA6	polyamid 6
PC	polykarbonát
PP	polypropylén



PP-B	polypropylén – blokový kopolymer
PP-H	polypropylén – homopolymer
PP-R	polypropylén – statický kopolymer
PS	polystyrén
PVC	polyvinylchlorid
VIN	projekt Virtual Injection Moulding



## 1. ÚVOD

Plasty jsou jednou z nejmladších, ale dnes již největších a nejrozmanitějších skupin konstrukčních materiálů. Jsou schopny splnit komplexní požadavky kladené nejen na výrobky spotřebního charakteru, ale našly i široké uplatnění v technické sféře - elektrotechnice, automobilovém a leteckém průmyslu. Ve strojírenství často nahrazují kovy, drahé speciální slitiny, sklo a keramiku. Díky rozvoji materiálového inženýrství se nově vyvinuté plasty svými vlastnostmi vyrovnají či dokonce předčí tradičně používané materiály při zachování příznivější ceny.

Dynamický rozvoj průmyslu, zvláště strojírenského, zvyšuje neustále požadavky na používané konstrukční a pomocné materiály. Využití plastů stále stoupá a zejména v procesu vstřikování plastických hmot dochází k orientaci na výrobu členitých a čím dál více tvarově složitějších výrobků při zachování vysoké rozměrové přesnosti. Nároky na kvalitu výrobku neustále rostou a tak se hledají nové možnosti při zpracování plastů. Právě nanokompozitní technologie jsou možným řešením. Tyto technologie nabízejí ve srovnání s konvenčními technologiemi podstatné zlepšení fyzikálních vlastností produktů a rozšiřují tak jejich aplikační možnosti.

Výzkumem a vývojem v oblastech nanotechnologií se otevírají možnosti pochopit nové jevy a rozvíjet tak nové vlastnosti na mikro i makro úrovni. Užití nanotechnologií se každým dnem rozšiřuje a již dnes se podílí na vytvoření nových materiálů a metod jejich přípravy, při dosahování cíleně modifikovaných užitečných mechanických, elektrických a dalších vlastností materiálů založených na unikátních vlastnostech nanočástic, nanovláken, kompozitních a nanostrukturních materiálů. K důležitým a zajímavým oborům využití nanočástic patří nanobiotechnologie. Ta používá nanostruktury a nanokomplexů včetně hybridních materiálů ovládaných vnějším magnetickým polem k získání nových lékových forem, které slouží např. pro přenos genetické informace. Nové polovodičové spintrionické materiály, nové nanostruktury vhodné pro detektory, fotopické krystaly či lasery úspěšně posunují vývoj nové generace nanosoučástek pro záznam a přenos informace. Ekologické využití našly nanotechnologie při výrobě katalyzátorů, ekologických barev či při fotokatalytických likvidací škodlivin ve vzduchu a ve vodě.

Nové nanomateriály začínají tedy úspěšně pronikat i do odvětví zpracování plastů v automobilovém průmyslu, kde je kladen velký důraz na rozměrovou přesnost a její další reprodukovatelnost při výrobě. Často musejí jednotlivé součásti dosahovat přesných rozměrů z důvodu následné kompletace technického dílce a proto hraje velikost smrštění při výrobě plastových dílů nemalou roli. Smrštění vyrobených součástí není materiálovou konstantou, ale interakcí několika technologických faktorů. Jeho celková velikost je ovlivněna konstrukcí dílu, zvoleným druhem zpracovaného materiálu, technologickými podmínkami vstřikování (velikost vstřikovacího tlaku, doba plnění, teplota taveniny, teplota temperačního média) a dodatečnými úpravami po vyrobení součásti (např. lakování).

Tématem řešení této disertační práce je problematika rozměrové přesnosti při použití nanokompozitů v termoplastické matrici v závislosti na podmínkách vstřikování. Je zde řešena závislost výrobního smrštění na vybraných materiálových, konstrukčních a technologických parametrech výstřiku ve tvaru desek o různých tloušťkách vyráběných z nanokompozitů s polypropylénovou matricí.

Při řešení této práce jsem si stanovil cíle:

- vypracování teoretického rozboru sledované problematiky smrštění výstřiků z termoplastů
- problematika plniv o velikosti nano ve vztahu k smrštění
- provedení experimentálních měření a vyhodnocení závislosti vlivu vybraných technologických, materiálových a konstrukčních parametrů na velikost výrobního smrštění, a na anizotropii
- provedení simulačních výpočtů v simulačním softwaru Cadmould a určení matematické závislosti velikosti smrštění na proměnných parametrech pomocí vstupních dat získaných v experimentálním měření.

## 1.1 Současný stav výzkumu nanokompozitů

Jak již bylo v úvodu zmíněno, dochází k expanzi použití nových nanomateriálů ve všech stěžejních průmyslových odvětvích. Zavádění materiálů plněných nanočásticemi přináší řadu změn do světa elektroniky, medicíny a

materiálového inženýrství, které je v této fázi asi nejdůležitější související aplikací vůbec [1]. Přehledy možných aplikací polymerních nanomateriálů v rozdílných odvětvích [2, 3] spolu se specifikací mechanických, chemických, elektrických či optických vlastností materiálů plněných nanočásticemi mapují nejen současné využití, ale naznačují i možný budoucí směr dalšího vývoje nanomateriálů [4, 5, 6, 7]. O samotných způsobech přípravy a výroby nanokompozitních materiálů existuje v dnešní době řada odborných prací [8, 9, 10].

Výzkum nanotechnologie a nanomateriálů je v rozsáhlé míře podporován z veřejných i soukromých prostředků, zejména v USA, Japonsku a v zemích EU. Další velké prostředky vydávají na výzkum nanotechnologie zejména velké nadnárodní firmy.

Problematika rozměrových změn u dílců vyráběných technologií vstřikování z nanomateriálů však není doposud v odborné literatuře zpracována. Chybí tak konkrétní informace o velikosti smrštění plastů plněných částicemi o rozměrech  $10^{-9}$  m včetně popsání vlivu technolických či materiálových parametrů na velikost tohoto smrštění.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

Smrštění je děj, jehož výsledek je dán interakcí velkého množství parametrů – např. termodynamických podmínek vstřikování, typu zpracovávaného materiálu, polohou výrobku v dutině formy či tvaru výstřiku. Některé ovlivní smrštění výrobku větší měrou, u jiných může být podíl na velikosti smrštění menší. V mnoha případech se může vzájemná interakce ovlivňujících parametrů podepsat na poklesu či růstu velikosti smrštění. Proto nelze chápat vliv parametrů separátně. Pro popsání konkrétního působení těchto vlivů je nezbytné pochopení fyzikálních zákonitostí dějů odehrávajících se v materiálu vstřikovaného výrobku během procesu vstřikování a i po skončení tohoto procesu.

### 2.1 Smrštění výstřiků z termoplastů [10, 12]

Tváření termoplastů technologií vstřikování je složitý tepelně mechanický proces, na němž se podílí tvářecí stroj, forma a tvářený polymer. Objemové změny výstřiku a tím i délkového smrštění jsou tedy ovlivňovány mnoha materiálovými, konstrukčními a technologickými faktory, z nichž každý je zatížen určitým rozptylem.

Smrštění výstřiku z termoplastů lze obecně definovat jako rozdíl mezi objemem tvarové dutiny formy a objemem finálního výrobku, který je způsoben fyzikálními ději probíhajícími během procesu vstřikování. Smrštění výstřiků se v praxi převážně stanovuje jako délkové smrštění a vyjadřuje se v procentech daného rozměru tvarové dutiny formy. Ojedinele se vyjadřuje také jako objemové smrštění. Vzájemný poměr mezi smrštěním délkovým (lineárním) a objemovým je přibližně 1:3.

Smrštění plastu není při vstřikování materiálovou konstantou, ale je závislé jednak na tepelně mechanické historii výstřiku, tj. na technologickém režimu výroby a dále pak na jeho geometrickém tvaru. Projevuje se hlavně v průběhu tuhnutí taveniny polymeru a v čase bezprostředně následujícím po vyjmutí výstřiku z formy. Objem výrobku po vyjmutí z formy a tím i velikost jeho rozměrů je výsledkem dvou dějů probíhajících současně v tvarové dutině formy v poslední části výrobního cyklu:

- smrštění tuhnoucí taveniny polymeru v důsledku snižování teploty
- elastického vyrovnávání vznikajících objemových deformací.

Smrštění je způsobené kombinací teplotního smrštění, objemové relaxace a relaxace orientace makromolekul termoplastů a u semikrystalických termoplastů má navíc vliv krystalizace. Výsledný objem výstřiku je určen především jeho teplotou a tlakem v dutině formy v okamžiku zatuhnutí vtoku. Z p-v-T diagramu vyplývá, že pokud bude za konstantní teploty zatuhnutí vtoku zvýšen vnitřní tlak v okamžiku zatuhnutí, poklesne měrný objem (vzroste hustota a hmotnost) výstřiku a dojde k redukci míry smrštění. Naopak při snížení vnitřního tlaku dojde ke zvětšení míry smrštění.

Ve zmenšené intenzitě však pokračuje zmenšování objemu i po delším časovém odstupu od výroby součásti. Celková hodnota smrštění (celkové smrštění) se dělí na výrobní smrštění (měřené 16 až 24 hodin po vyrobení) a na dodatečné smrštění, měřené po delším časovém odstupu od výroby.

Dodatečné smrštění se též nazývá jako dosmrštění. Dodatečné smrštění bývá obvykle několikanásobně nižší než smrštění výrobní. Protože se vstřikované výrobky dávají do používání brzy po vyrobení, probíhá dodatečné smrštění často až souběžně s následujícími funkčními rozměrovými změnami. Jelikož se při vyšších teplotách dodatečné smrštění urychluje, dá se zčásti předem realizovat tepelným zpracováním (temperováním v horké komoře při teplotě dané konkrétnímu plivu) a omezit tak nežádoucí změny rozměrů během používání výrobků s vysokými požadavky na přesnost rozměrů.

Je třeba dodat, že výrobní i dodatečné smrštění bývá anizotropní. Příčinou anizotropie smrštění jsou jednak vlivy struktury (orientace makromolekul, obsah plniva, stupeň krystalinity) a jednak vliv tvaru výstřiku.

Celkové smrštění pak vyjadřuje rozdíl mezi rozměry výstřiku po dodatečné úpravě a rozměry tvarové dutiny formy.

Výrobní i dodatečné smrštění rozlišujeme podélné (ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny) a příčné (ve směru kolmém ke směru toku taveniny).

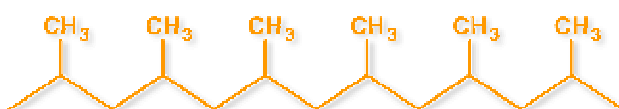
Porovnání a vyhodnocení jednotlivých dílčích vlivů na výrobní smrštění bylo provedeno v experimentální části pomocí zkušebních těles vyrobených technologií vstřikování. Použitými materiály byly dva druhy polypropylénu plněné plnivem o velikosti nano a proto jsou následující dvě kapitoly 2.2 a 2.3 věnovány popisu vlastností polypropylénu a nanokompozitů. Poté následují kapitoly popisující samotnou technologii vstřikování (kap. 2.5) a vliv jednotlivých technologických

parametrů na velikost smrštění (kap. 2.4). Kapitola zabývající se počítačovou simulací vstřikování rešeršní část uzavírá.

## 2.2 Polypropylén – semikrystalický plast pro vstřikování [13, 14, 15]

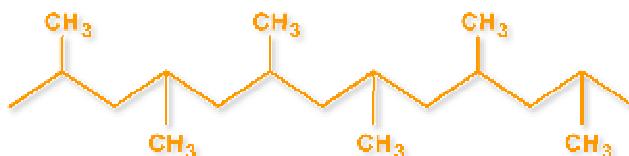
Polypropylén (PP) patří mezi komoditní plasty. Vyšší tuhost při nízké hustotě a použitelnost do vysokých teplot (bez namáhání) patří mezi jeho nejdůležitější vlastnosti oproti jiným plastům. PP je navíc odolný vůči únavě materiálu, má dobrou chemickou odolnost, tvrdost a zpracovatelnost (především vstřikování a extruze). V porovnání s ostatními plasty PP téměř nepropouští vodní páru. Polypropylén patří mezi nepolární semikrystalické termoplasty. Na rozdíl od čistě amorfních polymerů se část makromolekul formuje do krystalitů, které jsou nositelem pevnosti, tuhosti, odolnosti proti vrypu a jiných charakteristických vlastností polymeru. Nepolárnost PP zase umožňuje zpracování granulátu bez předcházejícího sušení.

Z hlediska molekulární struktury jsou možné tři odlišné typy polypropylénu: *Izotaktický* – postranní methylové skupiny jsou umístěny vždy na jedné straně hlavního polymerního řetězce (pokud si jej představíme v idealizované natažené podobě).



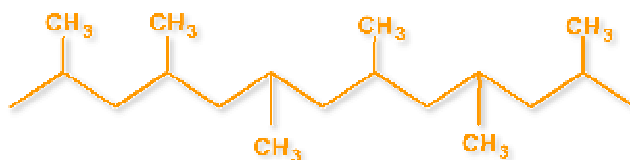
Obr. 1: Izotaktický polypropylén [13]

*Syndiotaktický* - postranní methylové skupiny se střídají po obou stranách.



Obr. 2: Syndiotaktický polypropylén [13]

*Ataktický* – má zcela náhodnou statistickou molekulární strukturu.



Obr. 3: Ataktický polypropylén [13]

Pravidelnost molekulárního řetězce podmiňuje nadmolekulární uspořádání, jmenovitě rozhoduje o schopnosti materiálu krystalizovat, a tím také o makroskopických vlastnostech materiálu. Komerčně je zatím nejvíce využíván izotaktický PP, v menší míře ataktický a syndiotaktický. Fyzikální a zpracovatelské vlastnosti PP jsou dané převážně molekulovou hmotností a v případě kopolymerů také typem a množstvím použitého komonomeru.

*Homopolymer PP* (PP-H) – jsou vyráběny polymerací propylénu na stereospecifických katalizátorech. Oproti kopolymerům jsou homopolymery tužší, mají lepší odolnost při vyšších teplotách, ale jejich rázová odolnost při záporných teplotách je omezená.

*Statický kopolymer* (random copolymer – PP-R) – vzniká náhodnou kopolymerací propylénu smíchaného s dalším komonomérem (může to být nejen etylén, ale též hexén či oktén). Obsah komonomeru se pohybuje od 1,5 – 6 hm. %. Přítomnost etylénu v polymerním řetězci redukuje tendenci krystalizovat, zvyšuje rázovou odolnost, zajišťuje větší rozsah tepelné stability a vylepšuje optické vlastnosti. Díky nižší krystalinitě mají kopolymery nižší bod tání a hustotu než homopolymery PP. Vlastnosti statického kopolymeru závisí na typu a obsahu použitého komonomeru. Jestliže je obsah komonomeru vysoký, klesne index izotakticity pod 75%, sníží se krystalinita a teplota tání klesne pod 135°C.

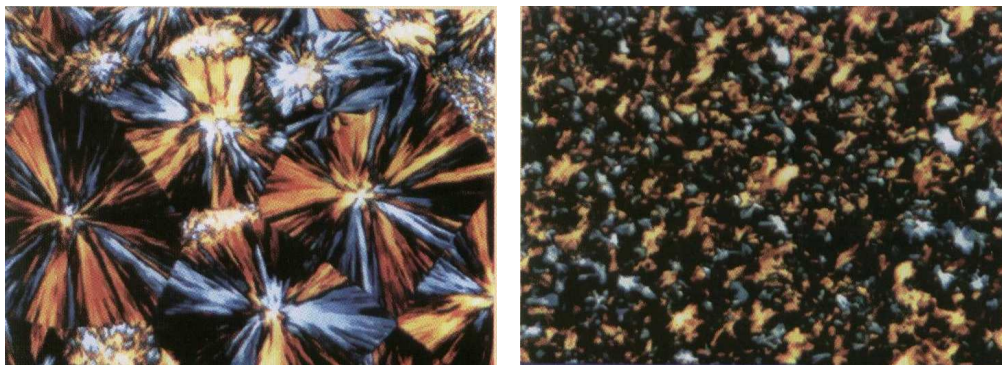
*Blokový kopolymer* (impact copolymer – PP-B) – je kopolymer propylénu s etylénem, přičemž polypropylénové a polyethylénové řetězce jsou uspořádané v blocích. Obsah etylénové složky je výrazně vyšší než u random kopolymerů. Kopolymerizovaná část má gumový charakter a tvoří separátní fázi oproti polymerní matici. Výsledkem je vyšší tuhost a vyšší rázová odolnost v záporných teplotách, avšak dochází ke zhoršení transparentnosti a bodu měknutí. Obsah kaučukovitých bloků se pohybuje v rozmezí 10 – 40 % a významným způsobem modifikuje vlastnosti PP. Díky snížení teploty skelného přechodu amorfnní části do oblasti – 40 °C se získá polymer odolný proti nárazu i při minusových teplotách.

Tab. 1: Porovnání vybraných vlastností PP-H, PP-R, PP-B [15]

Porovnání některých vlastností PP-H, PP-R a PP-B s porovnatelným indexem toku taveniny				
Vlastnost	Jednotky	PP-H	PP-R	PP-B
ITT 230°C/2,16kg [g/10min]	[g/10min]	4,1	4,4	4,1
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	1450	1100	900
Pevnost na mezi kluzu	[MPa]	35	24	25
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	[%]	10	8	12
Vrubová houževnatost Charpy při 23°C	[kJ/m <sup>3</sup> ]	5	60	9
Vrubová houževnatost Charpy při – 30°C	[kJ/m <sup>3</sup> ]	1,5	7	1,8
Teplota měknutí dle Vicata	[°C]	92	60	65
Koeficient lineární roztažnosti	[-]	1,35	1,5	1,85
Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]	907	898	900

*Plněný PP* – správným výběrem plniva, typu PP a kompaundační technologie je možné získat vlastnosti na úrovni inženýrských plastů. Vývoj v této oblasti silně rozšiřuje možnosti použití plněného PP. Jestliže se v minulosti používali plniva do PP především kvůli snížení ceny výrobku, dnešním důvodem je pomocí plniva zlepšit původní vlastnosti polymerní matrice (mechanické, elektrické, chemické, atd.). V závislosti na typu a obsahu plniva může plněný PP podléhat např. křehkému lomu už při relativně nízkém napětí. Rozdíly v pevnosti jsou v závislosti na použitém plnivu vyšší či nižší oproti homopolypropylénu. Rázové vlastnosti při záporných teplotách jsou vyšší právě u plněných PP, avšak za cenu jisté strnulosti, neohebnosti polymeru. Vrubová houževnatost u sklem plněných PP je nejvyšší hlavně díky schopnosti plniva zabránit šíření lomu. Smrštění plněného PP závisí na obsahu plniva. Při použití mastku a nebo CaCO<sub>3</sub> je rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním relativně nízký v porovnání se sklem plněným PP. Je to dáno orientací skleněných vláken při vstřikování ve směru toku. Výstřiky tím pádem mají nízkou smrštivost ve směru toku, ale vyšší ve směru kolmém na směr toku. Významný rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním může vést až k tvarovému deformování dílce. Pro zlepšení rozměrové stability lze použít jako minerální plnivo talek. Talek působí v polypropylénu také jako nukleární činidlo (viz. obr. 4.). Na zrnech talku se při modifikaci začíná tvořit velké množství zárodků a tím se zlepšují výsledné vlastnosti PP.





Obr. 4: Struktura polypropylénu:

a) bez nukleačního činidla    b) talek jako nukleační činidlo [54]

*Mechanické vlastnosti PP* – jsou silně ovlivňovány jeho molekulovou hmotností. Se zvýšením molekulové hmotnosti při zachování ostatních strukturních parametrů dochází k poklesu pevnosti, tuhosti, tvrdosti, snižuje se bod křehnutí a rázová odolnost. Mechanické vlastnosti ovlivňuje také krystalinita.

*Optické vlastnosti PP* – přírodní granule PP jsou mírně zakalené, u samotných výrobků však optické vlastnosti závisí nejen na použitém typu PP, ale též na tloušťce stěny a použitých zpracovatelských podmínkách. PP-R díky nepravidelné struktuře mají většinou lepší optické vlastnosti než PP-H. PP-B mají spíše zakalený charakter. Zlepšení optických vlastností se všeobecně dosáhne především rychlým procesem ochlazení, snížením teploty taveniny, přidáním klarifikačního činidla, vyleštěným povrchem formy a také nízkou teplotou formy. Příliš nízká teplota formy však snižuje povrchový lesk výrobků.

*Povrchové vlastnosti PP* – vysoká odolnost PP proti poškrábání a vrypům předurčuje použití PP v automobilovém průmyslu (příkladem použití mohou být přístrojové desky). Pro tyto aplikace jsou vhodné vysokokrystalické kopolymery (nízká cena a hmotnost nižší o 15% oproti ABS) s rovnocennou tuhostí a vyšší odolností proti napětovému lomu. Tvrdost povrchu výrobku je definována jako schopnost materiálu odolávat mechanickému poškození povrchu. K značnému poškození materiálu může dojít právě v místech, kde se odolné součásti z plněného PP dotýkají plastových součástí z jiných materiálů. Tomuto poškození

lze zabránit přidáním externího mazadla do součástí z plněného PP. U některých výrobků se využívá schopnosti PP pohltit zvukové vibrace a být tak dobrým zvukovým izolátorem. Výrobky z PS, ABS a HDPE mají svou vlastní rezonanci a mají tendenci se rozkmitat.

Spotřeba PP roste každoročně ze všech plastů nejvíce. Očekávaný nárůst výroby a spotřeby PP do roku 2010 se pohybují okolo 6%. Díky zjednodušení procesu výroby začal PP cenově konkurovat ostatním plastům a našel uplatnění např. při výrobě litých a vyfukovaných fólií. Spotřeba polypropylénu pro vlákna je celosvětově okolo 6 mil. tun za rok.

Tab. 2: Přehled vývoje světové spotřeby plastů [15]

Vývoj světové spotřeby plastů				
Rok		1990	2004	2010
Asie	[mil. t]	16,5	33,5	37,0
Japonsko	[mil. t]	12,0	6,0	5,0
Severní Amerika	[mil. t]	29,0	24,5	23,0
Západní Evropa	[mil. t]	28,5	21,0	19,0
Východní Evropa	[mil. t]	6,0	4,5	5,0
Afrika a Střední Východ	[mil. t]	4,0	6,0	6,0
Latinská Amerika	[mil. t]	4,0	4,5	5,0

Nárůst spotřeby PP je zejména v automobilovém průmyslu, kde se očekává spotřeba PP okolo 3 mil. tun při roční produkci 60 milionů automobilů v roce 2010. PP se začíná uplatňovat i při výrobě armatur a v některých aplikacích vytlačuje tradiční PVC. Nejvyšší spotřeba polypropylénu je v současnosti zpracovávána technologií vstřikování (okolo 14 mil. tun za rok), což je 43%-ní podíl z celkové spotřeby polypropylénu. Výzkum je zaměřený na inženýrské plasty a plněné plasty z PP a na dosažení takových vlastností, aby mohl PP svými vlastnostmi konkurovat ostatním plastům a svojí konkurenční cenou je vytlačit z trhu, čímž se otevrou další cesty dalšího nárůstu spotřeby PP.

## 2.3 Kompozity a nanokompozity [16, 18, 20, 21, 23]

Kompozit je každý materiál, který je složen z nejméně dvou fází s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Jednotlivé fáze ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu jednak svými vlastnostmi, jednak vzájemnou interakcí. Mezi parametry, na nichž závisí vlastnosti kompozitů patří:

- vlastnosti fází – mechanické vlastnosti a jejich poměr a anizotropie jednotlivých vlastností
- objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a jejich geometrické uspořádání v systému
- interakce jednotlivých fází, schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic a naopak.

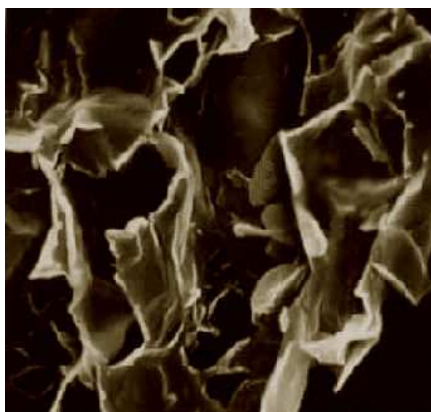
Určujícím faktorem kompozitů je velikost plniva. V našem případě lze nálezt jistou podobnost mezi laminárním systémem (jeden rozměr plniva je proti druhým dvěma rozměrům minoritní) a nanokompozitem (použité nanoplnivo k experimentálnímu měření má tvar destiček dispergovaných v matrici). Zdá se, že v příštím desetiletí se nanokompozitní technologie stanou špičkovým zpracovatelským procesem. Tyto technologie nabízejí ve srovnání s konvenčními technologiemi podstatné zlepšení fyzikálních vlastností produktů a rozšiřují jejich aplikační možnosti.

Nanotechnologie je proces, který zahrnuje široké spektrum přesně stanovených postupů, které vedou k získávání speciálních materiálů s nadmolekulární strukturou. Vyskytuje se prakticky ve všech směrech materiálového výzkumu. Pojem nanotechnologie se začíná používat na začátku devadesátých let. Pro oblast polymerní nanotechnologie představuje zpracování a výrobu polymerů obsahující plnivo, které má nejméně jeden rozměr  $10^{-9}$  m, tedy nanometrů. Plnivo pak představuje fibrilární plošné nebo globulární útvary, jejichž tloušťka nebo poloměr je v oblasti nanometrů. Je zkoumáno široké pole výkumů potenciálně významných materiálů, které jsou na bázi heterogenních anorganicko/organických struktur, ale i struktur polymer/polymer. Modifikace polymerů takovými typy plniv, jejichž alespoň jeden rozměr leží v oblasti nanometrů a patřící do oblasti plniv s velmi dobrým ztužujícím účinkem, může poskytnout technologické aplikace v různých oblastech. Mnohdy se však jedná o

vysoce specializované materiály, které mají své uplatnění v exkluzivních oborech, např. medicína, kosmonautika nebo elektronický průmysl. Pro případné masové aplikace se v průmyslových laboratořích používá rozdělení do tří směrů:

- polymery plněné uhlíkovými nanotrubičkami
- nanokompozity na bázi nanostrukturních siloxanů
- nanokompozity na bázi vrstevnatých minerálů (syntetické i přírodní formy)

Středem intenzivního výzkumu se stávají materiály na bázi vrstvených materiálů – jílu z důvodu širokého spektra uplatnění v komoditních materiálech. Významnou roli při výrobě a uplatnění na trhu hrají ekonomické parametry těchto materiálů, které jsou dané dostupností vrstevnatých jílu z přírodních zdrojů. Organojily jsou materiály volně se vyskytující v přírodě.

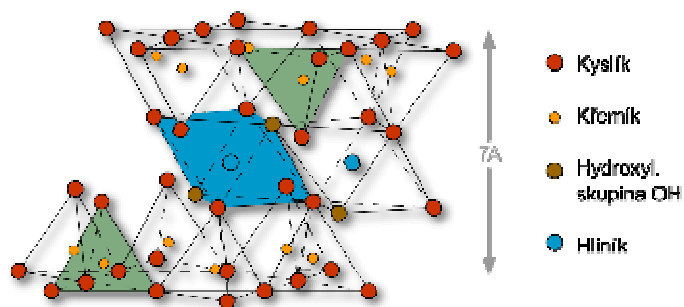


Obr. 5: Představitel jílových materiálů – montmorillonit [54]

Jílové materiály mají pozoruhodnou schopnost přijímat do své vlastní struktury velké organické molekuly, polymery nebo velké komplexní ionty. Tak vznikají umělé struktury se zajímavými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které lze navíc doladit dle potřeby. Další neméně významnou předností jílových materiálů je jejich nízká cena ve srovnání s cenou jiných látek obdobných vlastností. Zatímco v přírodních jílech jsou v mezivrstevním prostoru kationty kovů a proměnlivý obsah vody, v interkalových jílech je mezivrstevní prostor vyplněn molekulami, resp. komplexními ionty hosta (interkalátu). Fyzikální a chemické vlastnosti výsledného produktu (interkalátu) se řídí koncentrací a druhem hosta a hostitele. Proto by interkalace mohla přispět k vývoji nových materiálů s požadovanými vlastnostmi.

### 2.3.1 Montmorillonit [23]

V současné době je nejvíce využíván vrstevnatý jílový materiál montmorillonit (MMT). Základem nanoplniva je jeho morfologický element, aluminosilikátové destičky o tloušťce 1 nm. MMT je bílý, nažloutlý, nazelenalý, nahnědlý materiál vykytující se v podobě jemnozrnných agregátů složených z mikroskopických nedokonalých krystalů. Je běžnou složkou jílových hornin a půd. Vzniká i zvětráváním čedičových tufů a sopečných popelů a skel. Má široké využití - jako jílový výplach ve vrtech a k těsnění vrtů, v keramickém, farmaceutickém, ropném, gumárenském, kosmetickém průmyslu, atd.



Obr. 6: Atomová stavba montmorillonitu [54]

Již nepatrné množství těchto jílových částic (2 – 6%) za předpokladu rovnoměrné dispergace v polymerní matrici může vést k podstatnému zlepšení vlastností takového nanokompozitu. Těchto vlastností nelze dosáhnout pomocí tradičních plniv nebo jen při vyšším obsahu plniv. Tento výsledek je možné částečně vysvětlit enormně velkou mezifázovou plochou polymer/plnivo. Obvykle se dá prakticky dosáhnout 500 - 600 m<sup>2</sup>/g (u běžného plniva 50 – 100 m<sup>2</sup>/g). Destičkový tvar MMT plniva je také důležitým faktorem. Tyto hodnoty MMT stanovují cílové vlastnosti jako modul pružnosti, bariérové vlastnosti pro plyny, tepelnou odolnost, odolnost hoření.

### 2.3.2 Typy nanokompozitních systému [18, 19, 23]

V praxi se rozlišují 3 typy nanoplniva. Třídícím znakem je počet rozměrů dispergovaných nanočástic udávaných v nanometrech. Jestliže jsou tři rozměry v nanometrech (např. nanočástice siliky), lze hovořit o isomorfních globulárních částicích. U fibrilárních částic (např. uhlíkové nanotrubičky) spadají dva rozměry do oblasti nanometrů. Poslední skupinu zastupují plošná nanoplniva, kdy je

v nanometrech udáván pouze jeden rozměr. Plnivo představuje vrstvu silnou jeden až několik nanometrů a plošné rozměry dosahují stovky až tisíce nanometrů. Zástupci této skupiny jsou vrstevnaté jíly.

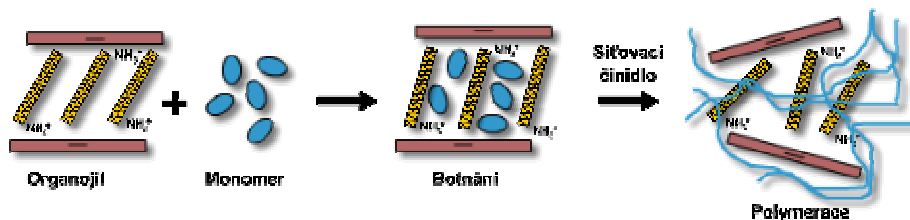
### 2.3.3 Způsoby přípravy polymer/jíl nanokompozitů

Obecně jsou známy čtyři způsoby přípravy nanokompozitů:

- polymerace in – situ
- roztoková polymerace
- příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru
- metoda SOL - GEL

#### 2.3.3.1 Polymerace In – situ [17, 20]

Tato metoda dnes již představuje běžný proces pro přípravu nanokompozitů. V prvním kroku je nabobtnán organojíl v monomeru. Následuje přidavek síťovacího činidla u termosetů a samotná polymerace. Polymerace může být zahájena tepelným působením, radiálně, difúzí iniciátoru do mezivrstev nebo katalyzátorem zabudovaným v mezivrstvě plniva. Touto technikou lze například vyrobit nanokompozity na bázi nenasycených polyesterů, polyuretanů, polystyrenu.



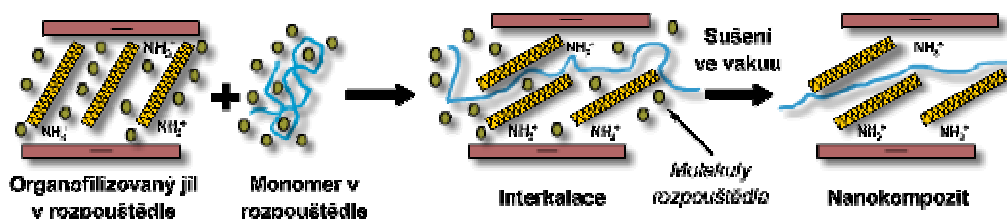
Obr. 7: Polymerace In – situ [20]

#### 2.3.3.2 Roztoková polymerace [17, 20]

Postup je podobný polymeraci in – situ s tím rozdílem, že místo monomeru je použito rozpouštědlo vhodné pro daný typ polymeru. Organojíl je dispergován v polárním rozpouštědle (např. v toulenu), kde dochází k jeho nabobtnání. Následně je v daném rozpouštědle rozpouštěn polymer. Oba roztoky se smísí a dochází k interkalaci mezi vrstvy organojílu. Posledním krokem je odstranění rozpouštědla. Vrstvy jílu se následně seskupí a polymerní řetězce se zafixují v mezivrstev. Vzniká tak mnohvrstvá struktura – interkalované nanokompozity.



Roztokovou polymeraci je možné použít např. pro přípravu nanokompozitů na bázi polyethylénu nebo polyimidu. Výhodou této techniky se představuje možnost přípravy nanokompozitů, jejichž základem jsou málo polární a nebo nepolární polymery. Nevýhodou, a to jak z ekologického, tak i z ekonomického hlediska, je však použití rozpouštědla, které musí být následně odstraněno.



Obr. 8: Roztoková polymerace [20]

### Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru [20, 23]

Podstata tohoto způsobu přípravy nanokompozitů spočívá v míchání roztaveného termoplastu s upraveným organojílem a následné ochlazení směsi. Skutečnost, že polymerní řetězce se mohou při transportu hmoty vmezeřit mezi vrstvy organojílu je překvapující, neboť gyrační poloměr polymerního klubka je mnohem větší než mezivrstevní vzdálenost jednotlivých vrstev organojílu. Uvěznění polymerního řetězce mezi silikátové vrstvy má na svědomí snížení celkové entropie makromolekulárních řetězců. Tato ztráta je kompenzována rostoucí konformační volností vázaných řetězců interkalátu na anorganické vrstvě plniva v důsledku rostoucí mezirovinné vzdálenosti. Vrstevnaté materiály jsou obecně látky vysoce hydrofilní, a proto prosté smíchání s nepolárním polymerem nemůže dát uspokojivý výsledek. Problém přípravy a výroby nanokompozitních materiálů lze rozdělit na dvě fáze:

- *organofilizace* - úprava vrstevnatého materiálu (MMT) za pomoci organických látek
- *kompoundace* – míchání polymeru a modifikovaného jílu (MMT)

#### 2.3.3.3 Organofilizace [20]

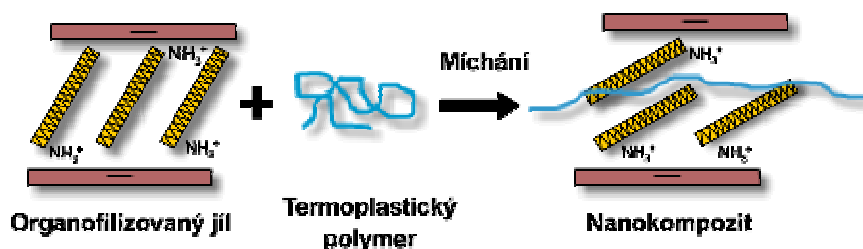
Tímto pojmem se označuje způsob úpravy jílového materiálu. Jedná se o MMT, který je smíchán s organickou látkou. Tímto smícháním dojde k interkalaci

organické sloučeniny mezi jednotlivé vrstvy a současně dochází ke zvětšení vzdálenosti d mezi vrstvami. V současné době existují dva způsoby interkalace:

- *ion – výměnná metoda* je založena na schopnostech MMT sorbovat dané kationty a zadržet je ve výměnném stavu. Tímto způsobem jsou připravovány produkty, které jsou dosažitelné na trhu.
- *ion – dipólová metoda* je založena na využití interkalace dipólů organických sloučenin a mezivrstevového kationtu. Tuto metodu rozvíjí hlavně firma Nanocor.

### 2.3.3.4 Kompoundace [17, 18]

Kompoundace je dalším důležitým krokem v postupu přípravy nanokompozitního materiálu s polymerní matricí, tedy upraveného MMT s polymerem. Pro získání požadovaných vlastností konečného produktu je nutné zvolit vhodný způsob míchání – kompoundace. Kompoundace by na jedné straně měla vést k co nejlepší dispergaci nanoplniva a současně během míchání vyvolat v co největší míře jeho exfoliaci, ale na druhé straně se musí zajistit co nejmenší degradace jak polymeru, tak interkalantu, který MMT obsahuje. Dosažení co nejlepší exfoliace nanoplniva v polymeru se provádí jednak už zmíněnou organofilizací, jednak lze měnit polární charakter pomocí tzv. kompatibilizátoru. Hlavním krokem pro dosažení vyššího stupně exfoliace v průběhu je rozpracování postupu míchání jednotlivých složek a k tomu použitého zařízení.



Obr. 9: Příprava nanokompozitů mícháním taveniny [20]

Prvním krokem je provedení modifikace MMT zvolenou organickou sloučeninou, který se v jednošnekovém nebo dvoušnekovém stroji smíchá s polymerem při teplotě přesahující teplotu tání polymeru. Díky tomuto kroku dojde k ještě většímu oddálení vrstev MMT, protože dochází k vmezeření řetězců částí polymeru do minerálu. Další činitel, který může ovlivnit dosažený stupeň rozdispergovaného MMT je typ použitého kompoudačního zařízení. Aby došlo



k rozpadu taktoidů montmorillonitu, je třeba dodat dostatečnou energii, která překoná vazebné síly mezi sítěmi MMT. Hodnota této energie je už zmenšena oddálením sítě interkalací, která může být odlišná podle postupu organofilizace. K vyššímu stupni rozdispergování částic plniva může dojít při vyšším namáhání systému v kompondaci. Toho lze dosáhnout zvýšením otáček šneku, popřípadě zvolením dvoušnekového hnětacího stroje místo jednošnekového. Větší tření a smykové síly způsobují dosažení vyššího počtu částic, které by se svými rozměry blížily nanorozměrům. Zatím se ukazuje, že prodloužením doby, kterou vzorek putuje technologickým zařízením, může být dosaženo dokonalejší disperze, exfoliace a orientace nanočástic plniva v polymerní matici. Na druhou stranu tato delší doba zdržení nemůže ve velké míře ovlivnit samotný interkalační a exfoliační proces bez přítomnosti vhodného interkalačního činidla. Toto činidlo hraje s velkou pravděpodobností klíčovou úlohu v procesu přípravy nanokompozitních systémů polymer/jíl. V případě extrémně dlouhých časů míchání pak dochází k rozlámání dispergovaných destiček jílu a tím se zmenšuje tvarový faktor. Tento fakt vede následně ke zhoršení vlastností nanokompozitního systému jako takového. Příprava nanokompozitů mícháním taveniny se jeví jako přitažlivý postup z důvodu jeho jednoduchosti a snadného použití v průmyslu při využití stávajícího zařízení.

### 2.3.3.5 Metoda SOL-GEL [20, 22, 23]

Další cestou ke vzniku polymerního nanokompozitu je technika SOL-GEL. V tomto případě se tvoří jak anorganická fáze, tak polymerní matrice v průběhu polymerace a to buď současně a nebo ve dvou stupních. Zatímco sol je koloidní stav, v němž se pevná fáze skládá z oddělených malých částíček, gel je souvislý materiál propojený molekulární sítí. Obvykle se jako gel rozumí polymerní síť nabobtnaná nízkomolekulární kapalinou. Procesy SOL-GEL tedy převedou původně koloidní suspenzi nebo roztok do souvislého materiálu. Nanokompozitní materiály lze připravit metodou SOL-GEL dvěma způsoby. První způsob spočívá v tom, že se předem připravené nanočástice rozptýlí v roztoku před hydrolýzou nebo v hotovém solu a během klasického postupu přípravy se pouze zafixují do polymerní sítě. Příprava nanokompozitů v polymerní matici rozptýlením již předem připravených částic je spojena s řadou problémů, z nichž největší je spojen s tvorbou nežádoucích agregátů nanočástic a tím nepravidelné rozptýlení nanočástic ve hmotě. Ani použití ultrazvuku a povrchově aktivních látek

neposkytuje vždy uspokojivé výsledky. Druhý způsob spočívá ve vzniku nanočástic až během přípravy materiálu, což může nastat v kterémkoli technologickém stupni. Obecný způsob přípravy spočívá v tom, že vhodné sloučeniny prvků tvořících budoucí nanočástice se rozpustí v roztoku spolu s ostatními složkami na pravý roztok a nanočástice se vytvoří až během hydrolyzy a polykondenzace.

Obecně by daný způsob přípravy nanokompozitu měl vést k maximální možné exfoliaci nanoplniva v polymerní matici za dosažení rovnoměrné dispergace částic. Zároveň nesmí docházet k degradaci polymeru a kompatibilizátorů přítomných v montmorillonitu ani k destrukci exfoliovaného nanoplniva. Získané výsledky potvrzují, že mícháním taveniny polymeru s organofilizovaným jílem lze úspěšně připravit nanokompozitní systémy.

### **Charakterizace nanokompozitních systémů polymer/jíl [20]**

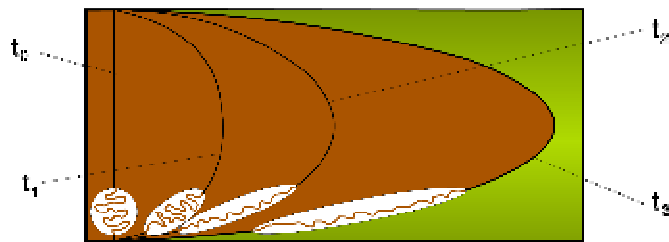
Pro charakterizaci výsledných nanokompozitů se používá dou hlavních metod a to rentgenografie a elektronové mikroskopie. Tyto metody nám mohou podat informace o struktuře výsledného materiálu. Informují tedy o stupni delaminace (exfoliaci) nanokompozitů. Pro hodnocení výsledných vlastností nanokompozitů se používají zkoušky běžné pro klasické polymerní systémy s ohledem na jejich výsledné použití.

## **2.4 Fyzikální vlivy na smrštění výstřiků z termoplastů**

### **2.4.1 Tok polymerních tavenin [24, 25]**

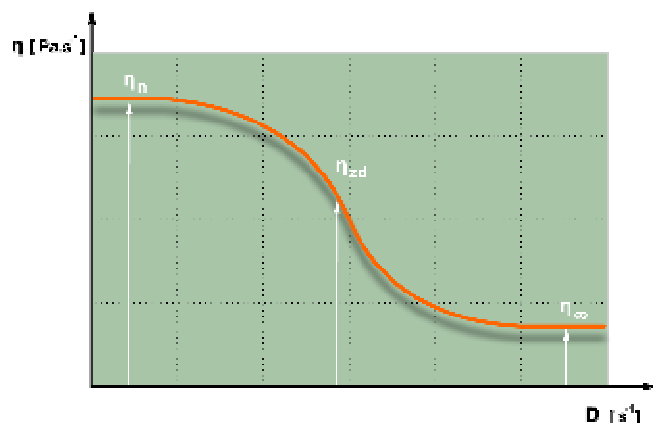
Taveniny plastů patří mezi nenewtonské kapaliny a vykazují závislost viskozity na smykové rychlosti. Se zvyšujícím se smykovým napětím resp. smykovou rychlostí klesá dynamická viskozita tavenin termoplastů. Takovéto nenewtonské kapaliny se nazývají pseudoplastické či strukturně viskózní. Tento charakter tokového chování zřejmě souvisí s řetězovým tvarem jejich molekul. V tavenině zaujímají makromolekuly tvar volně sbalených klubíček. Při velmi malých smykových rychlostech nastává při toku přemísťování klubíček jako celku, což

odpovídá oblasti konstantní viskozity  $\eta_n$ . Zvyšováním smykové rychlosti dochází k rozvinování klubíček do směru toku (viz obr. 10).



Obr. 10: Rozvinování klubíček do směru toku [45]

Více nebo méně rozbalené molekuly se pohybují snadněji, což se projevuje poklesem zdánlivé viskozity  $\eta_{zd}$ . V případě, že by došlo k dokonalému rozbalení všech molekul, pohybovaly by se po sobě jako hladké nitkovité útvary a viskozita by nabyla konstantní hodnoty  $\eta_\infty$ . Tohoto stádia však u tavenin plastů nelze v praxi dosáhnout.



Obr. 11: Průběh závislosti viskozity na smykové rychlosti [24]

V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí, tedy v oblasti zdánlivé viskozity, lze u polymerních tavenin popsat závislost smykového napětí na smykové rychlosti tzv. mocninovým zákonem (*Ostwald de Waelův model*):

$$D = \dot{\gamma} \cdot \tau^m \quad (1)$$

kde  $D$  - je gradient rychlostí ( $dv/dy$ ) [ $s^{-1}$ ] (rozdíl rychlostí 2 sousedních vrstev dělený jejich vzdáleností),  
 $m$  - je exponent mocninového zákona vyjadřující velikost odchylky tokového chování taveniny od chování newtonské kapaliny. Je větší než 1 (obvykle se pohybuje v rozmezí od 2 do 4,5),

$\Phi$  - je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při jednotkovém smykovém napětí.

*Elastické projevy při toku tavenin* - při toku polymerních tavenin se také kromě převažujícího viskózního toku (nevratná deformace) projevuje i elastické chování (vratná deformace). Je způsobeno tím, že zapleteniny a smyčky vytvořené makromolekulami se projevují jako částečně fixující body a vytvářejí tzv. fyzikální uzly. Při rychle působícím zatížení pak dochází nejen k nevratnému toku, ale i k orientaci makromolekul a jejich segmentů ve směru toku, která se projevuje vznikem normálových napětí během toku, relaxací napětí po zahájení a zastavení toku a zpětným krípem po zastavení toku. Elastické projevy se během procesu vstřikování výrazně mění vlivem snižující se teploty a měnící se viskozity taveniny. Orientace se projevuje tím více, čím nižší je teplota procesu. Je-li pak polymer prudce ochlazen, orientovaný stav zamrzne. Při pozdějším ohřátí nad teplotu, při které se již může dostatečně uplatňovat Brownův pohyb, se materiál vrací do původního stavu před orientací a způsobuje změny tvaru resp. dodatečné smrštění materiálu.

Velikost smrštění ovlivňují samotné vlastnosti plastů jako je např. jejich vnitřní struktura, orientace, krystalizace, tepelné vlastnosti, množství a druh plniv obsažených v matrici. Rozbor vlivů jednotlivých materiálových faktorů na smrštění je popsán v následujících kapitolách.

#### **2.4.2 Morfologie polymerů [24, 25, 28, 30, 43]**

Nadmolekulární struktura plastů se nazývá morfologie a má značný vliv na vlastnosti polymerů včetně velikosti smrštění. Do morfologie lze zahrnout takové faktory, jako je stupeň krystalizace, tvar krystalitů, jejich velikost a orientace, doménová struktura blokových polymerů apod.

Jestliže polymer obsahuje pouze dvojně vazby monomerní jednotky, mohou být jeho nadmolekulární strukturní řetězce pouze lineární. U polymerů s troj a vícenásobnou vazbou budou řetězce rozvětvené nebo zesíťované. Zesíťované uspořádání molekul je nahodilé, amorfní a může vzniknout už v procesu přípravy polymeru (např. polykondazace reaktoplastů) a nebo až dodatečným

pospojováním hotových lineárních řetězců prostřednictvím příčných vazeb (např. vulkanizace kaučuků, radiační síťování polyetylénu).

Ne všechny polymery mají stejnou schopnost krystalizovat. Některé krystalizují samovolně, jiné jen při zvláštních podmínkách a některé nekrystalizují vůbec. Nekrystalizující polymery zůstávají i v pevném skupenství v beztvarem, amorfním stavu. Jejich morfologie je podobná morfologii tavenin. Vyznačují se neuspořádanou strukturou a tvoří skupinu amorfních termoplastů. Druhou skupinu tvoří semikrystalické termoplasty.

Krystalizující polymery nemají v reálných podmínkách technologického zpracování možnost dokonalé krystalizace. Znamená to, že krystalizace se nezúčastní veškerá polymerní hmota. Důsledkem je skutečnost, že zkrystalizuje jen určité procento polymeru. Semikrystalické plasty se skládají ze dvou fází. Část takového polymeru je krystalická, zbylá část zůstává v amorfním stavu. Krystalická fáze je tvořena z pravidelně naskládaných molekulárních útvarů zvaných krystality. Krystality působí nejen jako tuhé vměstky, ale také jako kotvící místa molekul z amorfní fáze a i tím přispívají k tuhosti, pevnosti a teplotní odolnosti materiálu. Obecně platí, že krystalizující polymery mají vzhledem k amorfním větší modul pružnosti, pevnost i houževnatost, menší kaučukovitou oblast a výraznější oblast tání. Po orientaci vykazují vyšší zpevnění a také vyšší smrštění po následném ohřevu, než mají amorfní materiály. Relativní podíl krystalických oblastí v systému lze vyjádřit pomocí stupně krystalizace.

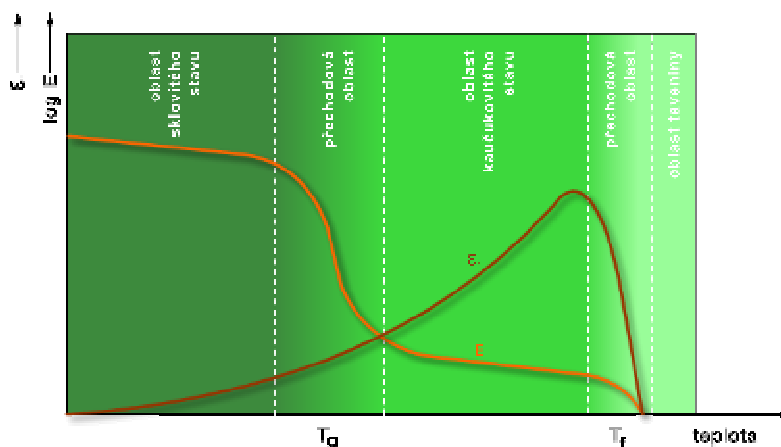
Nadmolekulární struktura plastů ovlivňuje velikost smrštění. Při tuhnutí amorfní taveniny semikrystalického plastu v dutině formy dochází k fázové přeměně, kdy je výrazný pokles měrného objemu spojen s fázovou přeměnou projevující se přiblížením molekul blíže k sobě a zaujmutím daných poloh v krystalové struktuře. Během této přeměny se amorfní tavenina promění na částečně uspořádanou semikrystalickou strukturu, což objasňuje větší smrštění semikrystalických plastů v porovnání s amorfními. Smrštění semikrystalických plastů může být několikrát větší než smrštění amorfních plastů.

### 2.4.3 Konformace řetězců [25, 28]

Konformace je takové prostorové uspořádání atomů a vazeb v molekule, které lze měnit vnitřní rotací kolem jednoduchých vazeb. Polymerní řetězce jsou ohebné. Jejich ohebnost je podmíněna možností rotací kolem jednoduchých vazeb v řetězci. Části řetězců se v důsledku vnitřních rotací dostávají do různých poloh. Tvar řetězce je tedy časově proměnlivý. Za vyšších teplot probíhají v tavenině konformační přeměny snadno a průměrný tvar řetězce se blíží neuspořádané, nahodile sbalené klubkovité formaci. S klesající teplotou se konformační přeměny zpomalují. Tvar klubka se působením vnější síly snadno mění a tento vratný děj podmiňuje některé vnější projevy plastů jako je orientace molekul, kaučukovité chování, nelineární závislost viskozity taveniny na smykovém napětí atd.

### 2.4.4 Přejíchodové teploty [13, 24, 28, 43]

Podobně jako u jiných materiálů jsou i vlastnosti plastů závislé na teplotě. V určité oblasti teplot se charakter vlastností mění rychleji či skokově. Takové oblasti se nazývají přejíchodové teploty.

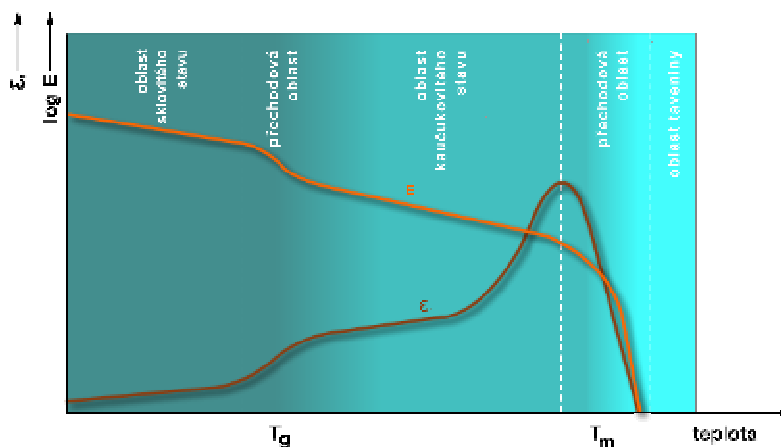


Obr. 12: Schématické průběhy závislosti tažnosti  $\epsilon$ , a logaritmu modulu pružnosti  $\log E$  amorfních polymerů na teplotě [24]

V případě lineárních amorfních polymerů je významnou teplotní oblastí teplota zesklenní  $T_g$  (někdy nazývána též teplotou skelného přejíchodu). Z molekulárního hlediska závisí teplota zesklenní na ohebnosti řetězce, na symetričnosti základních článků makromolekuly a na velikosti makromolekulárních sil. Pod  $T_g$  se polymer nachází ve stavu sklovitém (polymer je tvrdý a křehký, má

vysoký modul pružnosti), nad ní ve stavu kaučukovitém (polymer je elastický). U roztavených amorfních polymerů lze nalézt ještě jednu teplotní oblast, při níž intenzita změn narůstá. Při teplotě viskózního toku  $T_f$  se kaučukovitě pružná hmota mění na vysoce viskózní taveninu. Jestliže porovnáme velikost smrštění v závislosti na teplotě, tak v oblasti mezi teplotami  $T_g$  a  $T_f$  je smrštění výrazně větší než v oblasti pod  $T_g$ . Nad teplotou  $T_f$  se nacházíme již ve fázi taveniny polymeru a proto již o smrštění neuvažujeme. Obdobný vliv má teplota na smrštění i u semikrystalických plastů.

U semikrystalických polymerů dochází k nejrychlejším změnám v oblasti teplot, které charakterizuje teplota tání  $T_m$ . Při  $T_m$  se díky tepelným vibracím krystalové mřížky začnou krystalinity rozpadat a proběhne tání krystalitů. Hmota přejde z tuhého do kapalného stavu. Protože semikrystalické plasty obsahují určité množství amorfních podílů, lze i u nich stanovit teplotu zesklenní  $T_g$  charakterizovanou výraznější změnou vlastností. Tyto změny se ovšem týkají jen amorfní složky hmoty, takže čím je stupeň krystality u polymeru vyšší, tím menší jsou změny při  $T_g$  patrné.



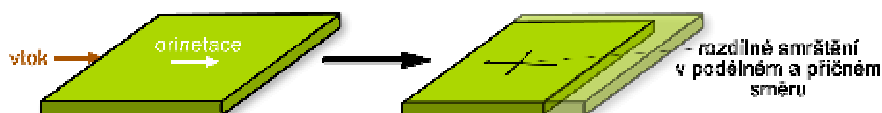
Obr. 13: Schématické průběhy závislosti tažnosti  $\epsilon_r$  a logaritmu modulu pružnosti  $\log E$  semikrystalických polymerů na teplotě [24]

#### 2.4.5 Orientace makromolekul [13, 24, 27, 28, 42]

Základním strukturním útvarem u termoplastů jsou makromolekuly. Tok taveniny je charakterizován přítomností smykových sil, které působí na makromolekuly plastu. Jestliže je plast v roztaveném stavu, zaujmou makromolekuly pro ně energeticky nejvýhodnější polohu, tzn. s minimální hodnotou Gibbsovy energie. Proto má páteř makromolekulárního řetězce tendenci

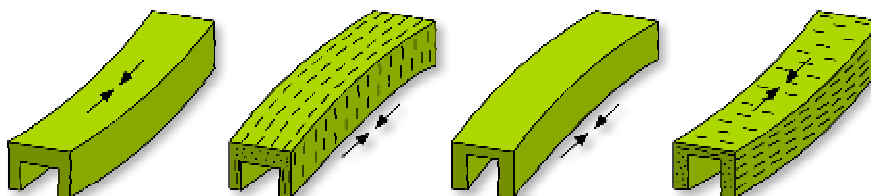
se sbalovat do klubíčka. Jsou-li tato klubíčka vystavena účinku smykových sil, více či méně se rozbalují a makromolekuly se uspořádávají ve směru toku, který je totožný se směrem působících napětí. Tento jev se nazývá orientace makromolekul.

Rychlé ochlazení takto zdeformované struktury zabrání navrácení makromolekul do původního stavu. Orientací se tedy makromolekuly dostávají do nerovnovážného stavu a proto mají snahu vrátit se do tvaru klubíček. K tomu však musí být dostatečně pohyblivé a musí mít k dispozici určitý čas. Pohyblivost makromolekul závisí hlavně na teplotě. Proces, kterým se ruší nebo aspoň snižuje orientace, se nazývá obecně relaxace nebo konkrétněji dezorientace. Dezorientace probíhá ve formě při současném ochlazování hmoty, takže v některých vrstvách nestačí proběhnout vůbec, v jiných jen zčásti.



Obr. 14: Anizotropie smrštění v důsledku orientace [45]

Důsledkem orientace makromolekul je vznik anizotropie smrštění výstřiku (viz. obr. 14). U neplněných plastů nebo u plastů s práškovým plnivem je smrštění ve směru toku taveniny větší než ve směru kolmém. Jejich rozdíl závisí na nadmolekulární struktuře plastu. U krystalických plastů může činit rozdíl podélného a příčného smrštění až 30 %, u amorfních plastů je tento rozdíl menší, přibližně kolem 10 %. Při vstřikování termoplastů s vláknitým plnivem (jako jsou např. skleněná vlákna) se smrštění zmenší a charakter anizotropie smrštění se obrátí (viz. obr. 15). Výrobní smrštění ve směru toku taveniny, jemuž odpovídá převládající směr orientace vláken, je menší než ve směru kolmém.



Obr. 15: Anizotropie smrštění výstřiků u neplněných a plněných materiálů [46]



To je způsobeno tím, že u orientovaných vláken se nemůže uplatnit relaxace. Hodnota smrštění ve směru toku taveniny je v rozhodující míře ovlivněna orientací plniva, ve směru kolmém je určena hlavně vlastnostmi matrice.

Kromě anizotropie smrštění vykazuje výstřik anizotropii mechanických a dalších vlastností. Setkáme se s ní např. i u součinitele teplotní roztažnosti, tepelné vodivosti a elektrických vlastností. Orientace je také zdrojem vnitřního pnutí. Ve směru orientace má výstřik vyšší pevnost a vyšší modul pružnosti, ale nižší tažnost a rázovou houževnatost než ve směru kolmém.

Podmínky pro vznik orientované struktury nejsou ve všech místech výstřiku stejné, takže stupeň orientace se ve výstřiku mění jednak ve směru tloušťky stěny, jednak se vzdáleností od vtoku. Tenká vrstvička plastu, která se vytvoří na stěně formy, „zamrzne“ dříve, než na ni začnou působit smyková napětí a zůstane neorientovaná. Stupeň orientace v ostatních vrstvách závisí na velikosti smykového napětí v daném místě. Smyková napětí jsou největší ve vrstvě těsně sousedící se ztuhlou povrchovou vrstvou. Nacházejí se tedy v určité vzdálenosti pod povrchem výstřiku. Směrem k ose smyková napětí klesají až k nule. Stejně se mění i orientace makromolekul. Největší je těsně pod povrchem, v ose není žádná nebo malá. Úroveň orientace také závisí na vzdálenosti určitého místa od ústí vtoku. Tlak, který působí na taveninu ve formě, totiž klesá od ústí vtoku směrem k čelu tekoucího plastu a na čele je roven tlaku atmosférickému. Protože smyková napětí vyvolávající orientaci jsou úměrná tlaku, musí se měnit i stupeň orientace ve směru toku. Se zvětšující se vzdáleností od vtoku se orientace snižuje.

#### 2.4.6 Reologické vlastnosti termoplastů [24, 25]

Relaxace se projevuje jak v oblasti taveniny, tak i v tuhém stavu, kdy je výrobek vyhozen z formy a dochází k měření rozměrových změn na výrobku. Reologické vlastností polymerů lze popsat pomocí následujících reologických modelů.

Složitá struktura polymerů se uplatňuje i v jejich komplikovanějším deformačním chování. Deformace při vnějším namáhání polymerů zahrnuje vždy současně složku elastickou, plastickou (viskózní tok) a navíc ještě tzv. deformaci zpožděně elastickou. Celková deformace je tedy časově závislá. Takové deformační chování se nazývá viskoelastické. V procesu vstřikování působí na

vstříkovaný termoplast poměrně velká smyková a normálová napětí při současných změnách jeho teploty. Rozdílné hodnoty působících napětí a teplot v různých místech výstřiku mohou být příčinou vzniku vnitřních pnutí. Vlivem uvolňování těchto pnutí vznikají další dodatečné rozměrové změny – dodatečné smrštění. Reálné systémy vykazují komplikované viskoelastické vlastnosti. Pro jejich pochopení je výhodné uvážit nejprve jednoduché kombinace elasticity a toku a znázorňovat si takové kombinace pomocí reologických modelů. Jedním ze dvou základních prvků reologických modelů je ocelová pružina, která je symbolem hookeovské elasticity a při deformaci se řídí rovnicí

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2)$$

kde značí       $\tau$  - smykové napětí [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]  
                     $G$  - modul pružnosti ve smyku [Pa]  
                     $\gamma$  - smykovou deformaci.

Druhým modelovým prvkem, který popisuje chování ideálně viskózní kapaliny, je netěsný píst, pohybující se v kapalině o viskozitě  $\eta$ . Chování pístu lze tedy vyjádřit rovnicí:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

kde značí       $\eta$  - dynamickou viskozitu [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]  
                     $\dot{\gamma}$  - smykovou rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ].

U obou prvků se rozměry volí tak, aby geometrické konstanty byly jednotkové.

Čím větší je počet prvků v modelu, tím lépe vystihuje model reologické chování reálného systému. Reologický model složený z obou modelových prvků zapojených paralelně se nazývá Kelvinův, popř. Voigtův. Při sériovém spojení modelových prvků je model nazýván Maxwellův. Při sériovém spojení Kelvinova a Maxwellova modelu získáme Tucketův model.

#### 2.4.6.1 Kelvinův model [24]

Při paralelním spojení pružiny s pístem je přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého bržděn - zpožďován viskózním prvkem. Kelvinův

model se tedy deformuje vratně, ale jeho elasticita není okamžitá, nýbrž časově závislá. Je to elasticita bržděná, zpožděná. Deformace obou prvků jsou stejné a napětí přispívají aditivně k napětí celkovému.

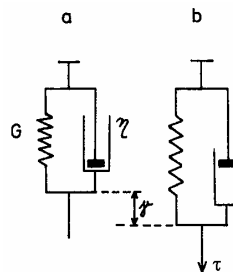
$$\gamma_{pruž} = \gamma_{píst} = \gamma \quad (4)$$

$$\tau_{pruž} + \tau_{píst} = \tau \quad (5)$$

kde  $\tau$  - je celkové napětí modelu,  
 $\gamma$  - jeho deformace.

Diferenciální rovnice Kelvinova modelu je:

$$G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \tau \quad (6)$$



Obr. 16: Kelvinův model, a - nedeformovaný,  
b - deformovaný účinkem napětí  $\tau$  [25]

#### 2.4.6.2 Maxwellův model a relaxační pokus [24]

Při sériovém spojení modelových prvků u Maxwellova modelu je celková deformace na rozdíl od Kelvinova modelu rovna součtu deformací prvků, ale napětí je v obou prvcích a v celém modelu stejné (viz. obr. 17).

$$\gamma_{pruž} + \gamma_{píst} = \gamma \quad (7)$$

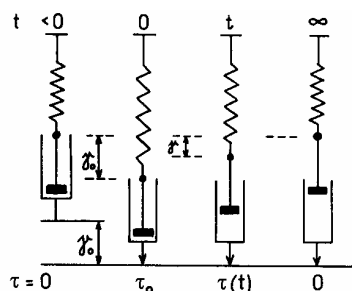
$$\tau_{pruž} = \tau_{píst} = \tau \quad (8)$$

Diferenciální rovnice Maxwellova modelu je:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\theta} = \frac{d\gamma}{dt} \cdot G \quad (9)$$

kde  $\theta$  – relaxační doba, která se spočítá:

$$\theta = \frac{\eta}{G} \quad (10)$$



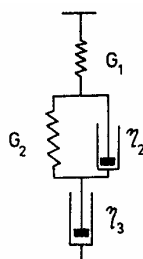
Obr. 17: Maxwellův model [25]

Při relaxačním pokusu se v určitém čase skokem vloží konstantní deformace  $\gamma_0$ . Při vložení deformace pružina zareaguje okamžitě, zatímco deformace pístu je nulová. Vzniklé počáteční napětí  $\tau_0$  je dáno pouze hookeovskou odezvou pružiny. Během času se však píst tahem pružiny pohybuje, deformace pružiny klesá a tím klesá napětí v modelu. Napětí Maxwellova modelu relaxuje při konstantní deformaci exponenciálně z počáteční hodnoty až na nulu pro čas  $t \gg \theta$ . Relaxace je tím rychlejší, čím menší je viskozita kapaliny v pístu a čím je tuhost pružiny (její modul) větší. U reálných materiálů se časový průběh relaxace napětí stanovuje experimentálně. Závislost napětí na čase Maxwellova modelu lze vyjádřit:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot e^{-t/\theta} \quad (11)$$

#### 2.4.6.3 Tuckettův model [24]

Z kvalitativního hlediska dobře vystihuje chování skutečných polymerů právě Tuckettův model, který je složen ze tří členů. Prvním je pružina, která představuje ideálně elastickou deformaci, druhým členem je Kelvinův model a třetím členem je netěsný válec s pístem představující viskózní tok, čili plastickou (trvalou) deformaci (viz. obr. 18).

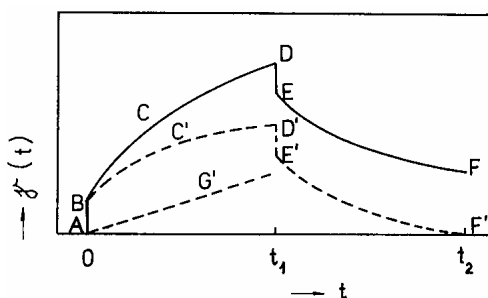


Obr. 18: Tuckettův model [25]

Tucketův model je popsán rovnicí:

$$\gamma(t) = \tau_0 \cdot \left[ \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \cdot (1 - e^{-t/\theta}) + \frac{1}{\eta_3} \cdot t \right] \quad (12)$$

Na obr. 19 jsou schématicky znázorněny křivky křípu a zpětného křípu v lineární časové stupnici. Tokový prvek zapojený v Tucketově modelu se při konstantním napětí deformuje lineárně s časem ( $AG'$ ) a křivka křivka Tucketova modelu je rovna součtu křivky  $ABC'D'$  a přímky  $AG'$ . Probíhá body  $ABCD$  a po dlouhých dobách se stává lineární se směrnici  $\gamma_0/\gamma_3$ . Zpětný křip se skládá z okamžitého zotavení  $DE$  ideálně elastické pružiny a ze zpožděně elastického zotavení  $EF$  Kelvinova modelu, které dohromady dávají vratnou deformaci. Zbylá deformace je nevratná a zvětšuje se s dobou předchozího křípu, popř. s teplotou, při které byl křip proveden.



Obr. 19: Schéma vlastností Tucketova modelu [25]

#### 2.4.6.4 Relaxační a retardační spektrum [24]

Přechody probíhající mezi dvěma elastickými stavy u reálných viskoelastických látek probíhají ve velice širokém časovém rozmezí, zpravidla nejméně čtyř až šesti řádů. Takové chování je možné popsat generalizovaným Maxwellovým modelem, ve kterém je k pružině paralelně připojen velký počet Maxwellových prvků, kde  $i$ -tý prvek má parametry  $G_i$ ,  $\theta_i$ . Relaxační modul generalizovaného modelu je součtem relaxačních modulů jednotlivých Maxwellových prvků a modulu připojené pružiny  $G_e$ .

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^j G_i \cdot e^{-t/\theta_i} \quad (13)$$

Závislost  $G_i$  na  $\theta_i$  se nazývá distribuce relaxačních dob nebo *relaxační spektrum*. Čím větší je počet prvků, tím lépe lze popsat naměřené závislosti. Relaxační modul je dán vztahem:

$$G(t) = G_e + \int_0^{\infty} g(\theta) \cdot e^{-t/\theta} d\theta \quad (14)$$

Retardační spektrum tvoří generalizovaný Kelvinův model. Tento model je sériové spojení pružiny s poddajností  $J_0$ , viskózního prvku a velkého počtu Kelvinových prvků s poddajnostmi  $J_i$  a retardačními dobami  $\theta_i$ . Závislost  $J_i$  na  $\theta_i$  přechází s rostoucím počtem Kelvinových prvků na kontinuální distribuční funkci retardačních dob neboli na retardační spektrum  $f(\theta)$ . Křípová poddajnost je pak popsána vztahem:

$$J(t) = J_0 + \frac{t}{\eta} + \int_0^{\infty} f(\theta) \cdot [1 - e^{-t/\theta}] \cdot d\theta \quad (15)$$

Spektra představují úplnou charakterizaci lineárního viskoelastického chování polymeru. Spektrum se ovšem musí nejprve získat z experimentálních údajů, změřených v širokém rozmezí dob či frekvencí.

#### 2.4.7 Obsah plniv [16, 27, 41]

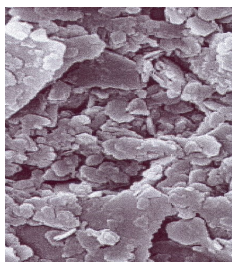
Typ plniva a jeho obsah v polymerní matici patří k dalším prvkům ovlivňující velikost smrštění a proto je tato problematika nastíněna v této kapitole. Při experimentálním měření bylo použito plnivo o velikosti nano, jemuž je věnována kapitola 2.3.

Plniva jsou přísady, kterými se upravují stávající vlastnosti materiálu. Jsou to látky, které se svojí strukturou, chemickým charakterem a fyzikálními vlastnostmi podstatně liší od vlastností polymerní matrice. Plasty tedy mohou obsahovat aditiva jako jsou tepelné a světelné stabilizátory, antioxidanty, plniva, změkčovadla, barviva a mnoho dalších. Zavedení plniv do polymerů ovlivní především pevnostní vlastnosti plněného materiálu, ale také řadu dalších významných vlastností, jako je tvarová stálost při zvýšených teplotách, tepelná roztažnost, propustnost par atd. Při volbě typu a množství plniva se často musí volit kompromis mezi vlastnostmi výsledného heterogenního systému a jeho zpracovatelností.

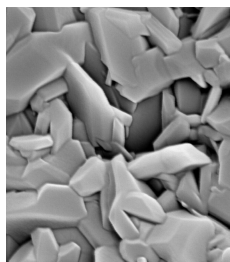
U výstřiků vyrobených z termoplastů má na smrštění největší vliv celkový obsah plniv v polymerní matrici. Plnivo má totiž většinou narozdíl od termoplastické matrice nižší součinitel teplotní roztažnosti. Je proto vždy důležité zvolit vhodnou volbu plniva a jeho množství. Při určitém stupni plnění se dosahuje optimálních nebo maximálních fyzikálních vlastností. Po překročení tohoto optima dochází k podstatnému zhoršení požadovaných hodnot fyzikálně-mechanických vlastností. Optimální koncentrace plniva se určuje experimentálně podle požadavků na výsledné vlastnosti.

Dle chemického složení lze plniva rozdělit:

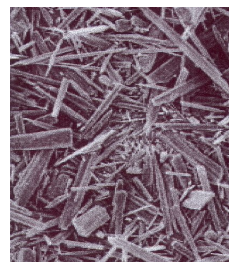
- uhličitan vápenatý
- kaolin
- oxid křemičitý a jeho deriváty (masek, křemičitan vápenatý a další silikáty)
- karbid křemíku
- oxidy, sírany a sirníky kovů
- kovové prášky
- saze
- uhlíková vlákna
- skupinu tzv. skleněných plniv



a)



b)



c)

Obr. 20: Příklady plniv [54]

a) kaolin

b) talek

c) kovové částice

Dle tvaru lze plniva rozdělit:

- částicové
- vláknové

Částicové plnivo může mít částice pravidelných tvarů jako koule nebo destičky, nebo nepravidelných tvarů anebo mohou být s plynnými inkluzemi. Granulární částice mohou být z látek různého druhu. Vláknová plniva mohou být dlouhá vlákna, která jsou obvykle v kompozitu uspořádána, nebo krátká vlákna, která jsou většinou v systému neuspořádána nebo jen částečně orientována. Dlouhá vlákna jsou nejčastěji skleněná, uhlíková nebo polymerní. Krátká mohou být také uhlíková, borová, wolframová, azbestová apod.

Plniva granulárního charakteru v závislosti na procentu plnění zvyšují tuhost, podstatně však snižují tažnost a rázovou a vrubovou houževnatost. Pevnost zvyšují málo. Tato plniva snižují teplotní roztažnost a tím i smrštění výstřiků.

Obsahuje-li hmota vláknité plnivo, jsou vlákna vlivem smykových sil rovněž orientována do směru toku taveniny. Výstřiky s vláknitým plnivem zpravidla vykazují vysokou anizotropii vlastností. Smrštění bývá vždy menší ve směru orientace vláken než kolmo na směr orientace. Je to způsobeno tím, že možnost smršťování ve směru orientace vláken je silně potlačena, zatímco ve směru kolmém nikoliv. Fyzikální a mechanické vlastnosti výstřiků s vláknitým plnivem závisí především na dokonalém spojení vláken s matricí, na délkách a množství vláken a na druhu matrice. Ve směru orientace vláken roste pevnost a modul pružnosti a klesá tažnost, v kolmém směru jsou poměry opačné. Následkem víření taveniny ve formě se v hotovém výstřiku vyskytují oblasti s různým stupněm orientace vláken, takže výsledná anizotropie vlastností nemusí být vždy výrazná. Vytvořenou orientaci vláken nelze relaxačním procesem ovlivnit.

#### **2.4.8 Krystalizace [25, 27, 36]**

Vznik krystalizace je podmíněn chemickou stavbou řetězce a může nastat jen u semikrystalických plastů. Makromolekuly se k sobě těsně přikládají a skládají se do tvaru lamel. Lamely jsou základním krystalickým útvarem a mohou vytvářet složitější útvary zvané sférolity. Oblasti mezi krystalickými útvary jsou amorfní. Krystalizace probíhá převážně při tuhnutí taveniny ve formě, později dochází ve výrobku ještě k velmi pozvolné dodatečné krystalizaci, která může být spojena s jistými trvalými deformacemi nebo i vznikem vnitřního pnutí. Krystalizace ve formě závisí na rychlosti tuhnutí taveniny. Chladnější forma a tenkostěnné části



výstřiku znamenají rychlé ztuhnutí a potlačení možnosti krystalizace a tím zůstává povrchová vrstva amorfni nebo jemně krystalická. U horkých forem a silnostěnných partií výstřiku jsou pod jemně krystalickým povrchem směrově orientované drobné sférolity, uvnitř jádra stěny pak velké neuspořádané sférolity. Procento krystalinity přitom roste od povrchu k jádru stěny. Tyto morfologicky různé krystalické oblasti vznikají postupně, nejprve na povrchu, nakonec uvnitř stěn, a mají každá různé smrštění. Odlišné smrštění mají i amorfni oblasti. Následkem těchto rozdílných smrštění vzniká ve výstřiku vnitřní krystalizační pnutí, které se dodatečnou krystalizací dále zvětšuje.

Podmínkou ke vzniku krystalizace jsou tedy potřebné vhodné kinematické podmínky (teplota, čas, tlak). Rychlost tvorby krystalické fáze popisují dva základní faktory a to rychlost nukleace a následná rychlost růstu krystalizačních zárodků. Nukleace (vznik zárodku krystalu) může být homogenní nebo heterogenní. V případě homogenní nukleace nejsou v soustavě přítomny žádné předem vytvořené zárodky nebo cizí povrchy. Při homogenní nukleaci vznikají zárodky nahodile v prostoru. V případě heterogenní nukleace jsou v soustavě přítomny cizí povrchy (náhodné nečistoty, zbytky katalyzátorů, zbytky krystalů neúplně roztaveného polymeru, stěny nádoby, záměrně dodané nukleární činidlo) a zárodek vzniká na nich. Tato heterogenní nukleace je typická pro polymery. Nukleace mnoha polymerů značně závisí na jejich teplotní historii. Malé uspořádané oblasti mohou v tavenině přetrvávat i po dlouhou dobu a po ochlazení pak působí jako předurčená centra krystalizace („samonukleace“). Jejich počet a rozměry závisejí na teplotě předešlé krystalizace a na teplotě a době, po kterou byl polymer taven.

Závislost stupně krystalizace (tj. obsahu krystalicky uspořádaných oblastí v semikrystalické soustavě) na době krystalizace vykazuje rysy typické pro dvoustupňový proces. V prvním stupni, při tzv. primární krystalizaci, proběhne největší část přeměny. Na něj pak navazuje mnohem pomalejší druhý stupeň, tak zvaná sekundární krystalizace. Primární krystalizace je charakterizována tvorbou krystalizačních zárodků a růstem sférolitů. Její celková rychlost se často charakterizuje poločasem krystalizace  $t_{0,5}$ , který představuje dobu, během níž proběhne polovina krystalizačních změn. Krystalizace polymerů neproběhne úplně, ale vždy zůstává v materiálu určité množství nekrystalizované (amorfni) fáze (10 – 80 %).

Projevy sekundární krystalizace jsou patrné již v posledních stádiích primární krystalizace a projevují se ještě po dlouhé době (řádově týdny až měsíce). Při sekundární krystalizaci dochází k uspořádávání toho materiálu, který byl pro špatnou krystalizační schopnost vypuzen z primárních krystalů. Během sekundární krystalizace se pomalu organizuje a částečně začleňuje do existujících lamel.

Vlivem krystalizace dochází k většímu rozdílu měrných objemů roztaveného a tuhého plastu mezi semikrystalickými a amorfními termoplasty, a tedy i smrštění výstřiků semikrystalických termoplastů je větší než amorfních. Vyšší krystalinita u téhož polymeru dává vyšší hustotu (větší smrštění), vyšší modul pružnosti, vyšší pevnost a mez kluzu, vyšší mez únavy, vyšší tvarovou stálost za tepla, zlepšenou chemickou odolnost, nižší tažnost, nižší rázovou a vrubovou houževnatost a nižší navlhavost (u navlhavých plastů).

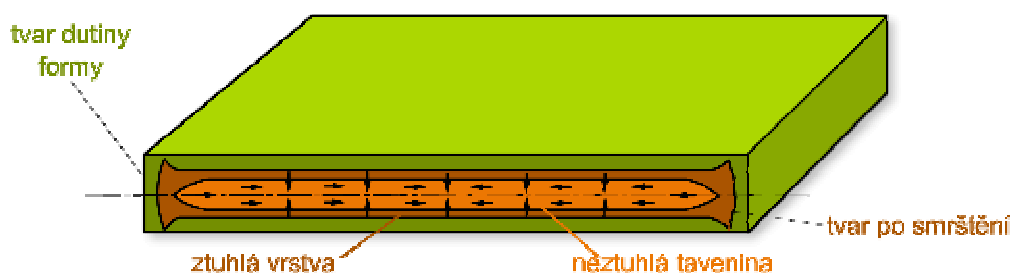
#### **2.4.9 Vnitřní pnutí [13, 28, 31, 33]**

Při vstřikování termoplastů dochází vždy ke vzniku vnitřního pnutí. Vnitřní pnutí je stav napjatosti ve výstřiku, který není vyvolán vnějším mechanickým zatížením, ale vzniká díky deformaci makromolekul polymeru při nerovnoměrných objemových změnách během procesu vstřikování. Nelze tomu zabránit, pouze je možné řídit vstřikovací proces tak, aby nepříznivý vliv vnitřního pnutí na vlastnosti výstřiku byl co nejmenší. Při namáhání výstřiku vnější silou, dochází k sčítání účinku vnější síly s účinkem napětí, jehož příčinou jsou vnitřní pnutí. Pak může dojít k porušení výrobku při podstatně menším vnějším namáhání, než se očekávalo. Vnitřní pnutí a jejich případná relaxace mají tedy vliv na deformaci výrobků a tím pádem i na celkové smrštění výstřiku. Rozdělit je můžeme dle příčin jejich vzniku na ochlazovací (též nazývány teplotní), orientační, vlivem efektu proudění, expanzní a krystalizační.

##### **Ochlazovací pnutí**

Příčinou vzniku ochlazovacího pnutí je teplotní gradient, který doprovází každé ochladnutí či ohřívání materiálu. Při vstřikování termoplastů dochází k nerovnoměrnému ochlazení různých částí výstřiku. Rozdíl teplot se utváří napříč stěnou výrobku. Velikost teplotního gradientu závisí na rozdílu teplot

taveniny a líce formy a na velikosti tloušťky stěny výrobku. Nerovnoměrná teplota formy podporuje vznik ochlazovacího pnutí. V jádru stěny probíhá ochlazování pomaleji a smršťování je větší, ale nemůže se plně uplatnit, protože mu v tom brání ztuhlá povrchová vrstva, ve které je ochlazování rychlé a smrštění malé (viz obr. 21). Důsledkem nerovnoměrného ochlazování je nerovnoměrné smršťování jednotlivých vrstev výstřiku.



Obr. 21: Nerovnoměrné ochlazování různých částí výstřiku  
– vznik ochlazovacího pnutí [26]

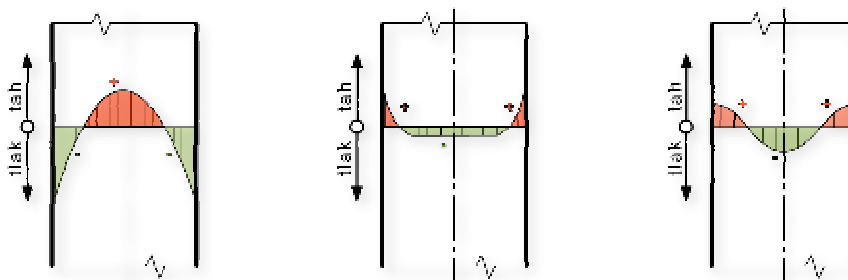
V povrchové vrstvě vzniká tlakové pnutí a v jádru stěny pnutí tahové. Ze stejných důvodů vzniká pnutí na rozích hranatých výstřiků nebo v ostrém ohybu stěn, protože na vnějších stranách výlisku je na rozdíl od vnitřních ohybů odvod tepla intenzivnější. Následkem nerovnoměrného ochlazování vznikají na vnějších stěnách tlaková pnutí, na vnitřním ohybu nebo na vnitřním rohu tahová pnutí. Další ochlazovací pnutí vznikají kolem kovových trnů, které ve výstřiku vytváří otvor a nebo kolem kovových zálisků. Je způsobeno rozdílnou tepelnou roztažností kovu a okolního plastu a souvisí se smršťováním plastu.

### Orientační pnutí

Orientační pnutí jsou důsledkem vlivu orientace makromolekul. Vznikají při tuhnutí taveniny po vytvoření orientované struktury během dalšího chladnutí materiálu následkem nestejné teplotní roztažnosti různě orientovaných oblastí výstřiku. Orientací se do molekul vnáší napětí, která mají snahu vrátit napřímené a natažené molekuly do tvaru klubíček. V místech vysokého stupně orientace je pnutí tahové, v okolních oblastech nižšího stupně orientace je pnutí tlakové. Pnutí jsou příčinou zejména samovolných deformací výstřiků při zvýšené teplotě a mohou vést k nepravidelným deformacím výstřiků a trhlinám.

## Pnutí vlivem efektu proudění

Čelo proudu taveniny je tvořeno chladnější vysokoviskózní povrchovou vrstvou, která se napíná a vzniká v ní plošná (biaxiální) orientace oproti ostatním vrstvám. Jakmile tato vrstva přilehne na stěnu formy a ztuhne, vznikne tahové pnutí na povrchu výrobku.



Obr. 22: Průběh napětí u vybraných typů vnitřního pnutí [27]

- a) ochlazovací pnutí
- b) pnutí vlivem efektu proudění
- c) expanzní pnutí

## Expanzní pnutí

Příčinou vzniku expanzního pnutí je stlačitelnost tavenin polymeru. Expanzní pnutí se objevuje tehdy, jestliže je při otevření formy výstřik ve formě ještě pod tlakem, např. následkem pružné deformace formy způsobené nadměrným vstřikovacím tlakem. Po vyjmutí z formy výrobek expanduje pod tlakem vnitřních dosud ne zcela ztuhlých partií. Po vyjmutí výstřiku z formy vnitřní vrstvy, které ještě nejsou zcela tuhé, se mají snahu rozpínat, ale této expanzi brání ztuhlé vrstvy na povrchu. Výsledkem jsou tahová pnutí na povrchu a tlaková v jádru stěny výstřiku.

## Krystalizační pnutí

Krystalizační pnutí se vyskytují u krystalických termoplastů. Vznikají následkem různého smršťování rozdílných krystalických oblastí a následkem dodatečné krystalizace. Vzniklé sférolity jsou největší ve středních vrstvách a směrem k povrchu se jejich velikost zmenšuje. Stejným způsobem se mění i smrštění.

Všechna uvedená vnitřní pnutí spolu superponují, takže výsledná napjatost je složitá a v objemu výrobku nerovnoměrně rozložená. Výsledkem spolupůsobení jednotlivých vnitřních pnutí bývá převážně tlakové pnutí v povrchové vrstvě a tahové pnutí uvnitř stěny, povrchová vrstvička mívá tlakové nebo tahové pnutí. Kritická místa jsou v okolí vrubů, zářezů, vnitřních a vnějších hran, otvorů apod., neboť zde dochází ke koncentraci napětí. Vlivem relaxace napětí se časem napěťové špičky vnitřního pnutí snižují a pnutí se z části vyrovnává. Ohřevem výrobku se může relaxace napětí urychlit. Úmyslný ohřev za účelem odstranění vnitřního pnutí a uvedení struktury do rovnovážného stavu se nazývá temperace výstřiků.

Technologií vstřikování byla vyrobena zkušební tělesa použitá v experimentální části. Následující kapitoly popisují princip této technologie a vliv jednotlivých technologických parametrů na velikost smrštění.

## 2.5 Fyzikální popis procesu vstřikování termoplastů [13, 24, 27, 33, 34]

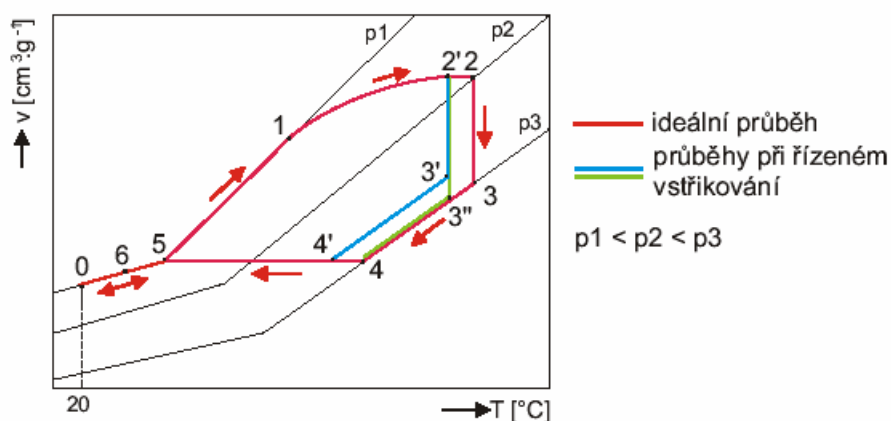
Z hlediska zpracovaného plastu lze rozdělit vstřikovací cyklus na 4 hlavní fáze:

- plastikace materiálu v tavicí komoře stroje
- vstříknutí taveniny do formy
- dotlak a chladnutí hmoty ve formě
- vyjmutí výstřiku z formy.

Pro popis procesu vstřikování je vhodné použít diagram  $p-v-T$  (diagram závislostí měrného tlaku - měrného objemu – teploty hmoty), který popisuje vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin u daného typu polymeru. Pokud bychom do  $p-v-T$  diagramu zakreslili průběh stavových veličin naměřených během celého procesu vstřikování od plastikace materiálu až po vyhození výstřiku z nástroje, dostali bychom uzavřený obrazec dle obr. 23, zobrazující následující fáze vstřikovacího cyklu:

## Plastikace materiálu v tavící komoře stroje

Hlavním cílem při plastikaci materiálu je vytvořit homogenní taveninu plastu, která zaujme místo před čelem šneku. Teplo potřebné k plastikaci materiálu je dodáváno jednak topnými tělesy, ale také jako frikční teplo vznikající působením otáčejícího se šneku na granulát. Při plastikaci se šnek otáčí a zároveň koná axiální pohyb. Začátek vstřikovacího procesu je v bodě 0, tedy při pokojové teplotě a barometrickém tlaku označeném jako  $p_1$ . Následuje ohřev hmoty v plastikační komoře probíhající pro zjednodušení stále při barometrickém tlaku. V bodě 1 se již uplatňuje hnětení a začíná narůstat tlak, až na hodnotu vstřikovacího tlaku  $p_2$ . Vlivem vysokého tření stále narůstá i teplota taveniny.



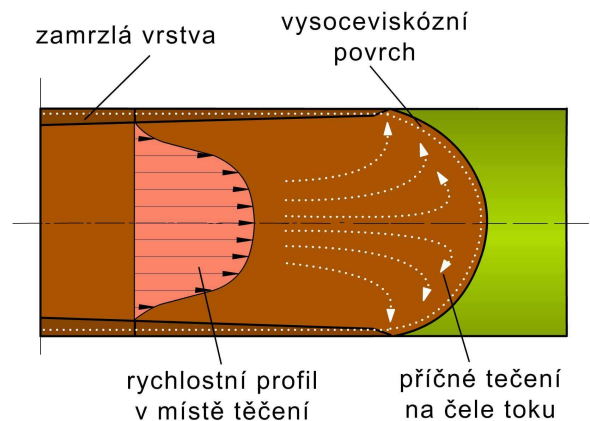
Obr. 23: Vstřikovací cyklus v diagramu  $p$ - $v$ - $T$

## Vstřik taveniny do formy

Vstřikování taveniny je proces, při kterém dochází k zaplnění celého objemu dutiny formy homogenní taveninou s následným stlačením. Samotný projev vstříknutí taveniny do prázdné a čisté formy je způsoben axiálním posunem šneku. Pro dosažení dobrých fyzikálních vlastností a kvalitního povrchu výrobku musíme dbát na to, aby tavenina vtékala do formy postupně nikoli volným paprskem.

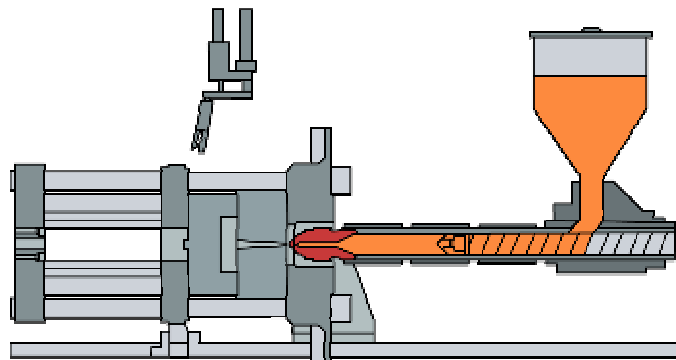
Při postupném plnění nazývaném též laminární vzniká uprostřed plastické jádro, což umožňuje stlačení taveniny v dutině formy a dotlačení v průběhu chlazení výrobku. Z důvodu konstantní rychlosti axiálního posunu šneku se pro většinu výstřiků volí konstantní vstřikovací rychlost. Při vstřikování tvarově

složitějších, výstřiků s tvarovými jádry, kovovými zálsky, vstřikováním výrobků s různou tloušťkou stěn, s vysokými požadavky na jakost povrchu a při vstřikování tepelně citlivých plastů, je z hlediska dosažení hodnotných produktů výhodné naprogramovat vstřikovací rychlost optimálně pro určitý výstřik, přičemž vstřikovací rychlost není konstantní v čase (vzniká tak určitý profil vstřikovací rychlosti).



Obr. 25: Tok taveniny [45]

Vlastní vstřikování začíná v p-v-T diagramu v bodě 2 prudkým nárůstem tlaku vyvolaným axiálním pohybem šneku, přičemž pro zjednodušení uvažujeme děj izotermický. Tlak stoupá až na svou maximální hodnotu  $p_3$  v bodě 3.



Obr. 26: Schéma vstřikovacího stroje

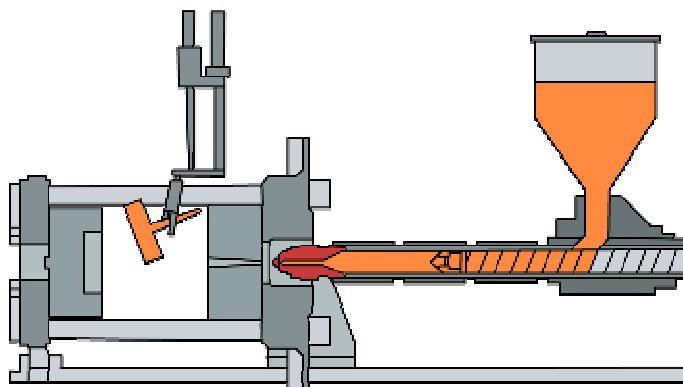
### Dotlak hmoty ve formě

Po zaplnění dutiny formy dochází ke stlačení taveniny, skokem vzroste tlak ve formě i v hydraulice stroje a rychlost, kterou bylo vstřikováno, okamžitě poklesne. Tlak v této době dosahuje svého maxima. Po dosažení maximálního tlaku se tlak vstřikovací přepne na dotlak. Toto přepnutí je následováno zakolísáním tlaku (špička při opožděném přepnutí, pokles nebo zpětný tok při předčasném přepnutí).

Dále dotlak probíhá ve dvou fázích. Mezi body 3 a 4 se jedná o dotlak izobarický, kterému přísluší hodnota tlaku  $p_3$ . V bodě 4 se změni na dotlak izochorický. Tato fáze končí v bodě 5, kde tlak dosáhne opět počáteční hodnoty  $p_1$ . Poloha tohoto bodu, neboli hodnoty stavových veličin v tomto bodě, zásadně ovlivňují kvalitu výstřiku a jeho vlastnosti (hmotnost, smrštění, mechanické vlastnosti). Ve fázi izochorického dotlaku, v okolí bodu 4, dochází také k zatuhnutí vtoku. Od tohoto okamžiku již dotlak nemůže ovlivňovat průběh tlaku v dutině nástroje.

### Chlazení výstřiku

Chlazení výstřiku probíhá ve formě již v době, kdy je tavenina vstřikována, ale hlavně když probíhá dotlačování. To jaké má chlazení parametry je ovlivněno především tvarem a tloušťkou stěn výstřiku, dále také teplotou taveniny, vstřikovací rychlostí, průběhem dotlaku, teplotou formy a samotným způsobem chlazení formy. Během procesu chladnutí taveniny klesá tlak v dutině formy až na hodnotu zbytkového tlaku, pod kterým se již ztuhlá hmota nachází v dutině formy před okamžikem otevření. Dostatečně vysoký zbytkový tlak je nezbytný pro eliminaci vzniku propadlin. Pokud je ovšem příliš vysoký, je pro vyhození výrobku zapotřebí zvýšené vyhazovací síly a vzniká nebezpečí zdeformování výrobku při vyjímání z formy.



Obr. 27: Vyjímání výstřiku pomocí manipulátoru

Maximální teplota při vyhození výrobku z formy musí být taková, aby byl výstřik dostatečně tuhý a při vyjímání z formy se nedeformoval. V praxi se k optimalizaci průběhu dotlačování a chlazení využívá ovládání vstřikovacího stroje mikroprocesorovým systémem. Tento systém se snaží regulovat průběh tak, aby probíhal za konstantního měrného objemu. Je to výhodné, jelikož se tak



evidentně zvýší kvalita výstřiku, docílí se optimálního smrštění, lze tak ovlivnit orientaci, vnitřní pnutí výstřiku a další vlastnosti s tím spojené.

Mezi body 5 a 6 dochází k chladnutí výrobku ve formě bez působení dotlaku a ke zvyšování jeho tuhosti. V bodě 6 se forma otevírá a výrobek je vyhozen. V oblasti mezi bodem 6 a bodem 0 chladne výrobek již mimo formu a postupně dosáhne teploty okolí, tedy výchozího bodu 0.

### 2.5.1 Vliv technologických parametrů vstřikování na smrštění

**[11, 33, 35, 36]**

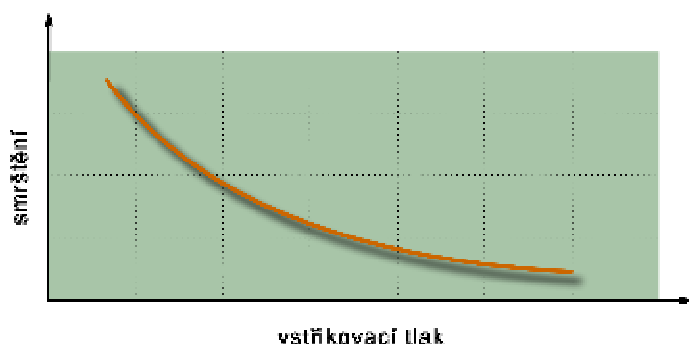
Při vstřikování termoplastů se uplatňuje řada technologických parametrů, které se podílí na finálních vlastnostech výrobku včetně velikosti smrštění. Technologické parametry lze rozdělit na základní (ovlivňují časový průběh teploty a tlaku taveniny v dutině formy) a na vedlejší (slouží k citlivému ovládání základních parametrů). Mezi základní parametry patří: teplota formy  $T_f$ , teplota taveniny při výstupu z trysky  $T_t$ , doba plnění formy (doba vstřiku)  $t_v$ , doba dotlaku (doba doplňování dutiny formy)  $t_d$ , doba chlazení  $t_{ch}$ , vstřikovací tlak  $p_v$ , dotlak  $p_d$ . Tyto parametry výrazně ovlivňují orientaci výstřiku, jeho vnitřní pnutí a stupeň krystalinity u semikrystalických plastů a tím pádem i velikost smrštění a rozměrovou stabilitu, dále pak pevnost, tuhost, odolnost proti opotřebení či tvrdost vstřikovaného dílce. Vedlejšími technologickými parametry jsou teploty temperačního média obou částí formy  $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$ , teploty jednotlivých pásem tavicí komory  $T_k$  a trysky  $T_{tr}$ , otáčky šneku  $n_s$ , doba plastikace  $T_p$ , doba manipulace  $t_m$ , zpětný tlak  $p_{zp}$ .

Vliv jednotlivých technologických parametrů na velikost smrštění nelze posuzovat odděleně, parametry se ve svých účincích na smrštění výrobku doplňují a nebo si naopak odporují. Výsledná velikost smrštění je dána jejich vzájemnou interakcí.

### 2.5.2 Vliv vstřikovacího tlaku [11, 26, 29]

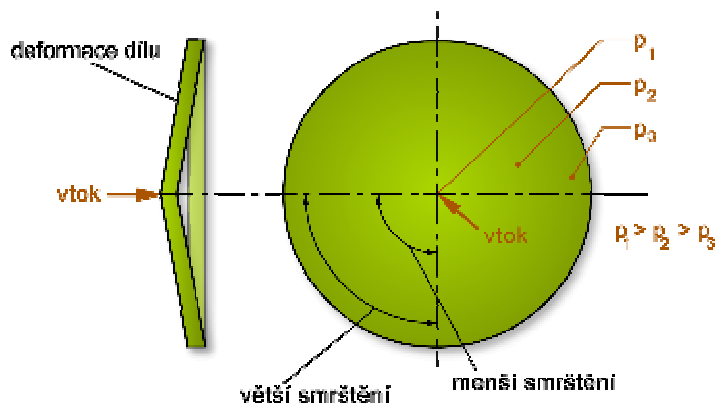
Pro kvalitu výstřiku je rozhodující velikost vstřikovacího tlaku taveniny v dutině formy. Vstřikovací tlak se na vstřikovacích strojích nastavuje pomocí tlaku hydraulického, který je vyvolán axiálním pohybem čela šneku vstřikovacího stroje. Průběh vstřikovacího tlaku se řídí v závislosti na dráze šneku, čase a tlaku

v dutině formy pro jednotlivé fáze vstřikování. Vstřikovací tlak musí být dostatečně vysoký k zaplnění dutiny formy taveninou polymeru. Maximální vstřikovací tlak je limitován velikostí uzavírací síly vstřikovacího stroje. Tlak nesmí překročit tlak vyvinutý uzavírací silou vstřikovacího stroje. Nadměrný vstřikovací tlak by mohl otevřít vstřikovací formu a dovolit poškození výrobku či formy. Optimální vstřikovací tlak závisí na teplotě taveniny, přesněji na její viskozitě, a dále na délce toku taveniny ve formě, na tloušťce stěny a členitosti výstřiku.



Obr. 28: Závislost velikosti smrštění na vstřikovacím tlaku [26]

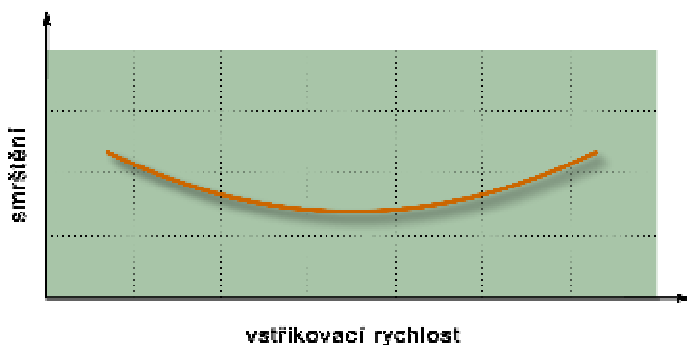
Vyšší vstřikovací tlaky přispívají k zmenšení smrštění. Je zde jisté kolísání vstřikovacího tlaku s nejvyšším průběhem v místě vtoku a nejnižší hodnotou v nejzazším místě formy. Obvykle materiál nejvzdálenější od vtoku tuhne první. Teplo vyvolané třením materiálu ve vtoku obvykle drží materiál v oblasti vtoku poněkud teplejší, způsobující, že oblast ztuhne poslední. Tato oblast má často menší smrštění, které je způsobené dlouhým trvalým tlakem v oblasti vtoku. Rozdílné smrštění (deformace) je částečně efektem rozdílné teploty dutiny formy. Možnou cestou monitorování tlaku v dutině formy je umístění tlakových snímačů uvnitř formy.



Obr. 29: Deformace způsobená rozdílnou velikostí smrštění u vtoku a na kraji výstřiku [26]

### 2.5.3 Vstřikovací rychlost [26, 29]

Vstřikovací rychlost ovlivňuje sekundární ohřev plastu při jeho vstřikování do formy. Při průchodu taveniny vtokem vzniká v materiálu třecí teplo. Díky vyšším vstřikovacím rychlostem může v důsledku ohřevu materiálu třecím teplem dojít až k jeho degradaci.



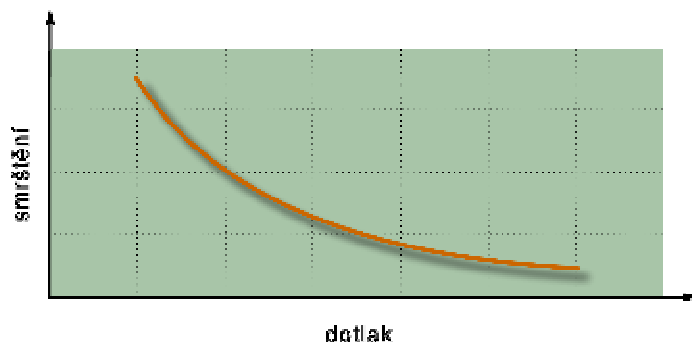
Obr. 30: Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění [26]

Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci makromolekul výstřiku. Jestliže je plnění pomalé, materiál začíná chladnout dříve než je dutina zcela zaplněna a tlak potřebný k plnění dutiny formy stoupá. Příliš nízká vstřikovací rychlost tedy zabrání plnění dutiny formy, protože materiál zchladne během plnicí fáze a vtok zamrzne před úplným zaplněním dutiny formy, což vede k většímu smrštění dílu. Optimální vstřikovací rychlost závisí na geometrii dílu, velikosti a poloze vtoku, teplotě taveniny a teplotě formy. Deformace výstřiku může být někdy eliminována pečlivou úpravou vstřikovací rychlosti a teploty formy. U dílu se silnými stěnami a relativně malým vtokem může vést zvednutí teploty formy k oddálení nežádoucího zatuhnutí vtoku. Tyto změny obvykle přinášejí menší smrštění výstřiku.

### 2.5.4 Dotlak a čas dotlaku [11, 26, 27, 29, 32]

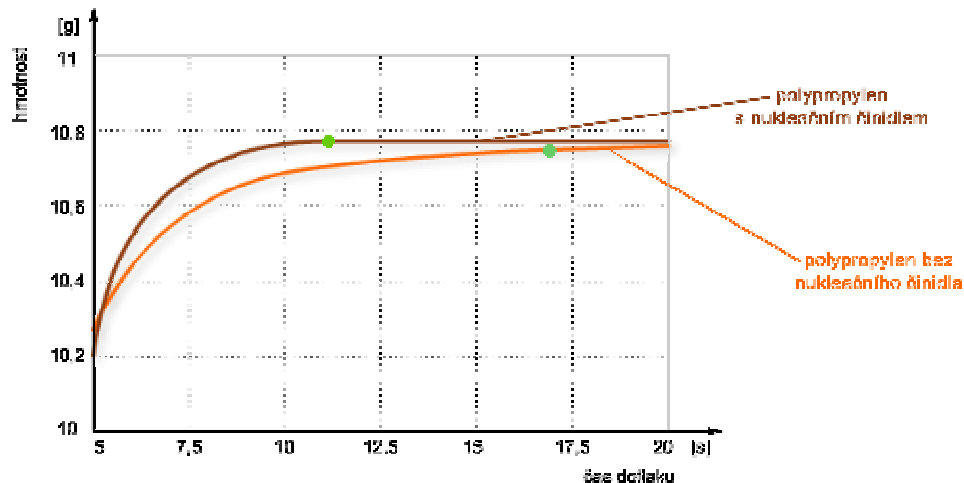
Velikost dotlaku a jeho trvání by měli odpovídat postupu smršťování ve formě. Při zvýšení dotlaku dojde k vyššímu stupni plnění formy, zmenší se volný objem polymeru a tím se zmenší smrštění. Dotlak má vliv na vnitřní stav výrobku, kterým se myslí struktura výrobku, stupeň orientace makromolekul, vnitřní pnutí a další. Zvyšováním tlaku ve formě se zmenšuje pohyblivost segmentů makromolekulárních řetězců polymeru, což zpomaluje relaxační procesy orientovaného polymeru a zmenšuje se tak výrobní smrštění. Vyšší dotlak u

semikrystalických materiálů znesnadňuje ukládání makromolekul do krystalitů a tím je smrštění sníženo. Příliš vysoký dotlak může způsobit vysoký zbytkový tlak a s ním spojené následné potíže při vyjímání výstřiků. Nízký dotlak u tlustostěnných výstřiků může být příčinou povrchových propadlin, vnitřních staženin či mikropórovitosti. Průběh dotlaku lze na moderních strojích vhodně programovat. Na počátku je vyšší, ke konci doby dotlaku se snižuje. Snižování dotlaku se děje ve více stupních anebo plynule podle p-v-T diagramu. Časově se dotlak překrývá s dobou chlazení výstřiku ve formě. Nepřiměřený čas dotlaku dovolí materiálu expandovat zpět z formy do vtokového systému, jestliže je dotlak ukončen před zatuhnutím vtoku. Jakmile vtok zatuhne, nemůže již materiál cestovat z formy ani do formy. Delší působení dotlaku po zatuhnutí vtoku je neefektivní a pouze prodlužuje vstřikovací cyklus.



Obr. 31: Závislost velikosti smrštění na dotlaku [26]

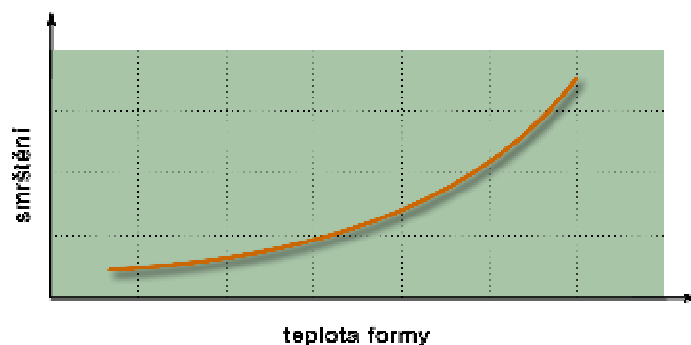
Okamžik zatuhnutí vtoku lze experimentálně stanovit vážením výstřiků zhotovených při různých dobách dotlaku a zhotovením grafické závislosti hmotnost výstřiku [g] – doba dotlaku [s]. Pokud křivka začne nabývat monotónního průběhu, lze říci, že dotlak je již neúčinný z důvodu zatuhnutí vtoku. Na velikost doby působení dotlaku má vliv struktura materiálu. Materiál s nukleačním činidlem získá strukturu dříve (viz. obr. 32) a díky tomu není třeba delší čas působení dotlaku jako u materiálu s absencí nukleárního činidla.



Obr. 32: Vliv vnitřní struktury na velikost působení dotlaku [26]

### 2.5.5 Teplota formy [11, 24, 26, 32, 35, 40]

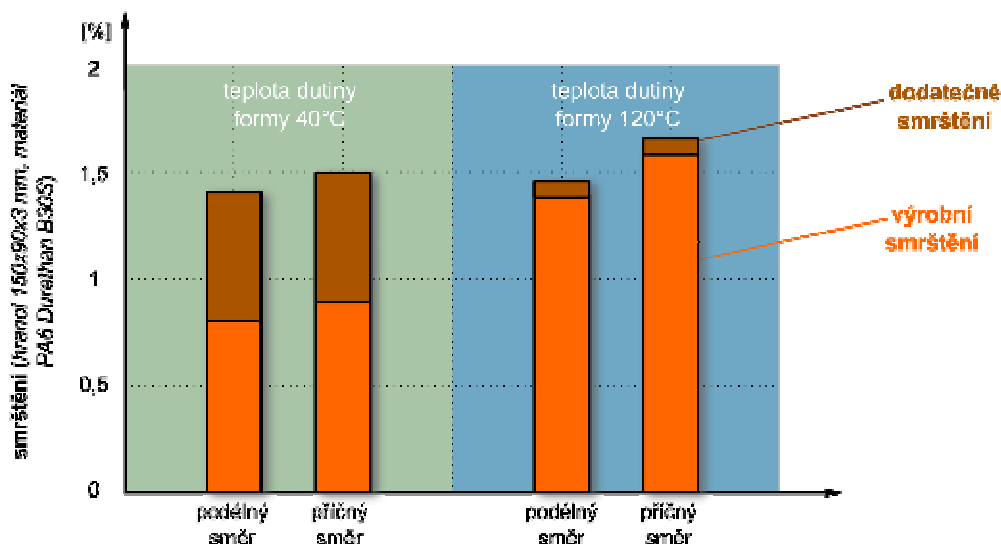
Teplota formy ovlivňuje rychlost chladnutí. Teplota formy ovlivňuje zabíhavost taveniny ve formě, a tedy rychlost plnění dutiny formy, rychlost ochlazování výrobku, tzn. dobu chlazení. A tím i dobu trvání vstřikovacího cyklu. Z ekonomického hlediska by bylo nejvýhodnější zvolit dobu chlazení co nejkratší a tím zkrátit vstřikovací cyklus výroby, z technologického hlediska by měla být doba chlazení naopak co nejdelší (ovlivňuje vlastnosti dílů vyrobených především z krystalických polymerů).



Obr. 33: Vliv teploty formy na velikost smrštění [26]

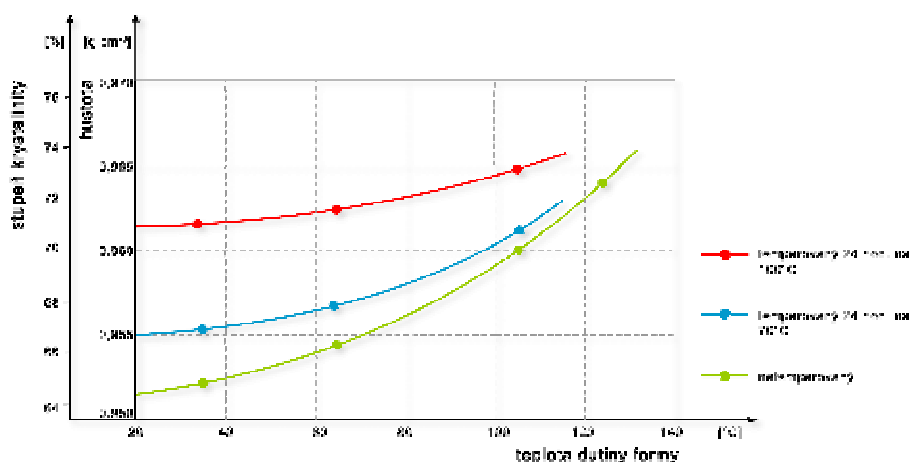
Při rychlejší době ochlazení plastu je kratší čas pro vnitřní uspořádání jednotlivých makromolekul a tím pádem i menší výrobní smrštění. S rostoucím časem ochlazení dílu vznikají větší a četnější vnitřní struktury, které mají negativní vliv na velikost smrštění, proto rychlé ochlazení výstřiku redukuje velikost smrštění. Čím vyšší je teplota formy, tím větší má hmota zabíhavost a tím nižší může být vstřikovací tlak či delší dráha tečení v dutině formy. U vyšších teplot

formy chladne výstřik rovnoměrněji, takže se snižuje vnitřní pnutí a zlepšují se mechanické vlastnosti, zvyšuje se jeho stabilita tvaru i rozměrů. U semikrystalických plastů tedy vzrůstá s rostoucí teplotou taveniny podíl krystalické fáze, a tím i hustota, což vede ke zvýšení výrobního smrštění. U amorfních plastů má vyšší teplota formy vliv na relaxaci vnitřního pnutí a na větší uspořádanost, čímž roste materiálová hustota a smrštění. Rychle zchlazené výstřiky jsou náchylné k větší míře dodatečného smrštění a deformací.



Obr. 34: Vliv teploty dutiny formy na výrobní a dodatečné smrštění [26]

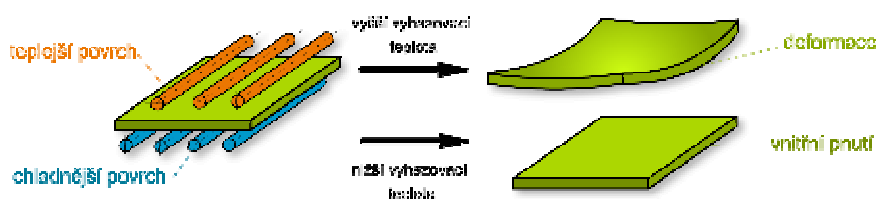
Vyšší teplota formy tedy zlepšuje dlouhodobou stabilitu dílu a minimalizuje dodatečné smrštění a creep. Volba optimální teploty formy závisí především na druhu zpracovaného materiálu, na jeho reologických vlastnostech, vstřikované teplotě a celkovém množství tepla, které je nutné odvést.



Obr. 35: Vliv teploty a teploty dutiny formy na stupeň krystalinity u semikrystalického plastu [35]

Pro maximální stabilitu dílu používaných za zvýšených teplot by měly být plastové výrobky temperované. Podmínky temperace (velikost teploty a čas jejího působení) mohou doporučit výrobcí plastových materiálů. Temperace podporuje relaxaci vnitřního pnutí.

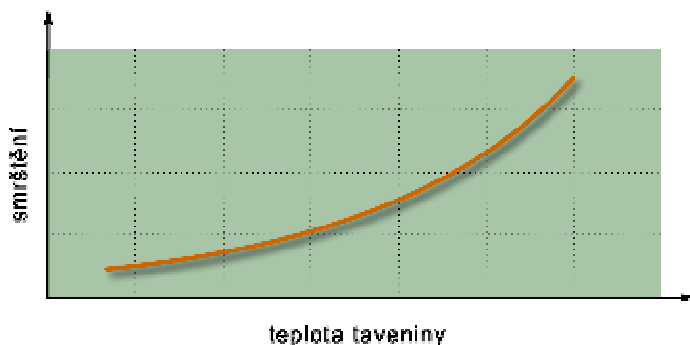
Doba chlazení určuje v podstatě délku vstřikovacího cyklu a tím i hospodárnost zpracování. Doba chlazení se volí co nejkratší tak, aby byl výrobek při vyhození z formy dostatečně tuhý a nedeformoval se. Tloušťka stěn výstřiku a teplota formy patří mezi vlivy podstatně ovlivňující velikost doby chlazení.



Obr. 36: Vliv nerovnoměrného chlazení na deformaci dílu [45]

## 2.5.6 Teplota taveniny [11, 24, 26, 32, 35]

Velikost teploty taveniny přímo ovlivňuje viskozitu roztavené hmoty a následně i výši a průběh tlaku a dotlaku ve formě a dobu chlazení. Teplota taveniny se pro dosažení co nejlepšího zaplnění dutiny volí co nejvyšší s ohledem na nebezpečí tepelné degradace plastu. Zvýšením vstřikovací teploty klesá viskozita taveniny a tím i tlakové ztráty v tlakové komoře, ve vtokových kanálech i v dutině formy, což se projeví zvýšením vnitřního tlaku a dotlaku i při konstantní hodnotě vnějšího tlaku. Vlivem pomalejšího chladnutí se prodlužuje doba zatuhnutí vtoku, vnitřní tlak v okamžiku zatuhnutí vtoku se zvyšuje, což je příčinou zmenšování smrštění výstřiku.

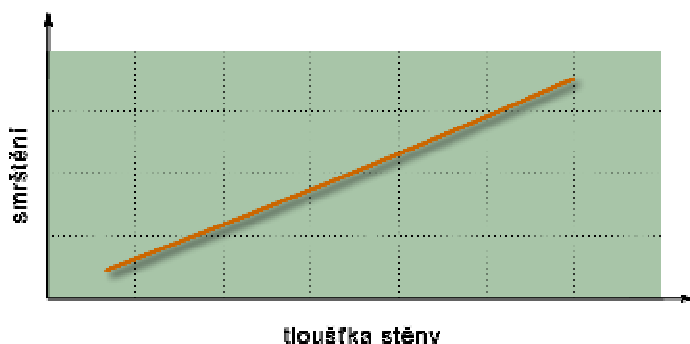


Obr. 37: Závislost velikosti smrštění na teplotě taveniny [26]

Při vyšší teplotě taveniny klesá smykové napětí v tavenině, a snadněji probíhá relaxace orientace, což ve směru orientace vede k zvětšování výrobního smrštění a snižování dodatečného smrštění. U semikrystalických plastů má teplota taveniny vliv na rychlost krystalizace. V tavenině zůstává určité množství částečně uspořádaných makromolekul, které působí jako budoucí krystalizační zárodky a vyšší teplota taveniny jejich počet snižuje. Vyšší teplota taveniny tak může způsobovat částečné zpomalení krystalizace a přispívat ke snižování smrštění semikrystalických plastů. Smrštění je také ovlivňováno homogenitou taveniny. Homogenní tavenina plastu, podmíněna správně zvolenou teplotou, umožňuje rovnoměrnou krystalizaci polymeru s rovnoměrným smrštěním výstřiku. Celkový účinek teploty taveniny na smrštění není v důsledku rozdílných vlivů na vlastnosti polymeru jednoznačný. Většinou vyšší teplota taveniny způsobuje menší smrštění výstřiků.

### 2.5.7 Tloušťka stěny [11, 24, 26, 31, 35]

Rovnoměrnost tloušťky stěny je podmínkou pro stejnou a rovnoměrnou rychlost proudu taveniny ve formě, stejnou rychlost chlazení ve všech místech výstřiku, rovnoměrnější smrštění a minimální vnitřní pnutí. U výrobků se zvětšenými tloušťkami stěn je potřebný delší čas k jejich ochlazení a zatímco silné stěny tuhnou pomaleji, je zde dostatek času k relaxaci vnitřního pnutí, k vyššímu stupni krystalizace a tím pádem i k vyšším hodnotám smrštění.



Obr. 38: Průběh závislosti velikosti smrštění na tloušťce stěny výstřiku [26]

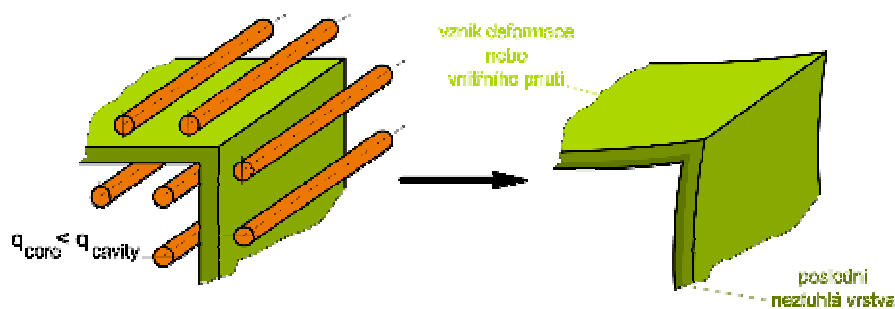
Širší stěny jdou lépe plnit, protože roztavený materiál může déle protékat dutinou formy. Ostré rohy či změny průřezů představují pro proud taveniny překážky a způsobují zavírání taveniny, různou orientaci makromolekul, následkem toho i vnitřní pnutí a nerovnoměrné smrštění. Se zvětšující se



vzdáleností od ústí vtoku klesá i tlak v dutině formy a proto je v různých místech tvarově složitých výstřiků různá velikost smrštění. Minimální přípustná tloušťka stěny je určena požadovanou tuhostí a pevností výrobku. Dále by měla být zohledněna požadovaná tolerance rozměrů a kvalita povrchu. Při volbě tloušťky stěny tedy musíme vzít v potaz funkční hledisko (pevnost, tuhost), hledisko technologické (zabíhavost taveniny plastu v dutině formy, nebezpečí degradace, vnitřní pnutí a orientace) a hledisko ekonomické (spotřeba materiálu, doba chlazení). Velikost výsledné tloušťky bývá kompromisem mezi těmito parametry.

### 2.5.8 Tvar výrobku [11, 24, 26, 31, 35]

Z konstrukčního hlediska musí výrobek splňovat požadované nároky na pevnost, tuhost, toleranci rozměrů a kvalitu povrchu. Technologičnost tvaru vstřikovaných výrobků znamená dodržovat určité zásady jako je rovnoměrná tloušťka stěny, maximální délka toku taveniny, zaoblení stěn, úkosity a umístění vtoku. Při umístění vtoku je třeba dbát na to, aby tavenina vtékala do nejtlustšího průřezu výstřiku a tekla směrem k nejtenčímu místu. V opačném případě umístění vtoku ztuhne materiál v tenké stěně dříve než v tlusté a nelze již dotlačovat taveninu do pomalu chladnoucí tlusté stěny a nahrazovat tam objem materiálu zmenšující se tuhnutím. Výsledkem značného smrštění hmoty jsou vnitřní staženiny a povrchové propadliny v tlusté stěně. Stejný negativní vliv jako rozdílná tloušťka stěn má i hromadění materiálu v některých částech výstřiku např. v místech napojování žeber.



Obr. 39: Vliv geometrie výstřiku na smrštění [45]

Jádra a kovové zálinky zabraňují volnému smršťování materiálu a jsou příčinou zvýšení tahových pnutí ve výstřiku. Předehřevem kovových záleků a zvětšením hmoty plastu lze vnitřní pnutí snížit. Dodatečné smrštění rozměrů s omezeným smrštěním je v důsledku uvolňování vnesených pnutí proto větší.

Tvarové faktory také ovlivňují anizotropii smrštění. Rozdíl mezi smrštěním ve směru toku a ve směru kolmém na tok taveniny se s rostoucí tloušťkou stěny zmenšuje. Pro snadnější vyjmutí hotového výrobku z formy bývají rovnoběžné stěny výrobku opatřeny technologickými úkosi, které snižují potřebnou vyhazovací sílu a zabraňují deformacím působením vyhazovačů. Používané minimální vnitřní úkosi bývají v rozmezí 1 až 2° a vnější 0,5 až 1°.

### 2.5.9 Vtok a vtokové kanály [26, 27, 29]

Při vstřikování má druh a umístění vtoku podstatný vliv na proudění taveniny ve formě, vytváření tzv. studených spojů, orientaci makromolekul a plniva, rovnoměrnost krystalizace, anizotropii vlastností a rozměrů, povrchový vzhled (lesk, tokové čáry), vznik vnitřních dutin a propadlin a tím pádem i na velikost smrštění. Tyto strukturní vlastnosti jsou ovšem ovlivněny také technologickými podmínkami při vstřikování. Vtok má být zásadně řešen tak, aby tavenina naplnila formu nejkratší cestou bez velkých teplotních a tlakových ztrát, co nejrychleji a pokud možno ve stejném čase. Tento cíl je snáze dosažitelný u menších a tvarově jednodušších výstřiků. Velikost a tvar průřezu ústí vtoku ovlivňuje tlakové ztráty při průtoku taveniny plastu a dobu zatuhnutí vtoku. V případě obdélníkového průřezu ovlivňuje dobu zatuhnutí vtoku zejména tloušťka zvoleného vtoku. Pro přesné výstřiky jsou vhodné plné toky oproti bodovým, ve kterých tavenina rychleji ztuhne předčasně a znemožní působení dotlaku. Průřez vtokových kanálů musí být dostatečně velký, aby zůstalo jádro vtokového kanálu v plastickém stavu a umožňovalo ve fázi dotlaku doplňování taveniny.



Obr. 40: Rozdílná velikost smrštění vzhledem k poloze vtoku [45]

## 2.6 Analýza procesu vstřikování z hlediska výpočtu smrštění [36]

Na konečné rozměry výstřiku a tedy i na velikost výsledného smrštění působí při vstřikování mnoho faktorů. Pro výpočet míry smrštění se vychází ze znalosti základních stavových termodynamických veličin a to tlaku, měrného objemu a

teploty. Velikost smrštění je převážně určena z velikostí těchto veličin v okamžiku zatuhnutí vtoku. Od tohoto okamžiku se již hmotnost výstřiku nemění. Zejména u semikrystalických plastů je nutno brát v úvahu význam vlivu struktury výstřiku, která je v nerovnovážném stavu i po zatuhnutí vtokového ústí a má tendenci se postupně stabilizovat. Zahrnutí strukturních vlivů do analýzy smrštění výstřiků je však poměrně obtížné a z těchto důvodů je i obtížný případný výpočet smrštění vlivem strukturních změn. Pro zjištění odhadu smrštění lze použít efektivně v podstatě dvě metody:

První metoda je založena na analýze procesu vstřikování pomocí p-v-T diagramu vstřikovaného plastu, do kterého je zakreslen odhadovaný průběh stavových veličin uvnitř dutiny vstřikovacího cyklu. Smrštění výstřiků je definováno jako procentuální rozdíl lineárních rozměrů výstřiku vůči rozměrům formy. Za předpokladu izotropních vlastností lze tyto rozměrové změny určit ze smrštění objemového. Vzájemný poměr mezi lineárním smrštěním a objemovým smrštěním je 1:3. Přesný přepočtení lineárního smrštění z objemového lze získat ze vztahu

$$S_L = \left(1 - \sqrt[3]{1 - (S_V/100)}\right) \cdot 100 \quad (16)$$

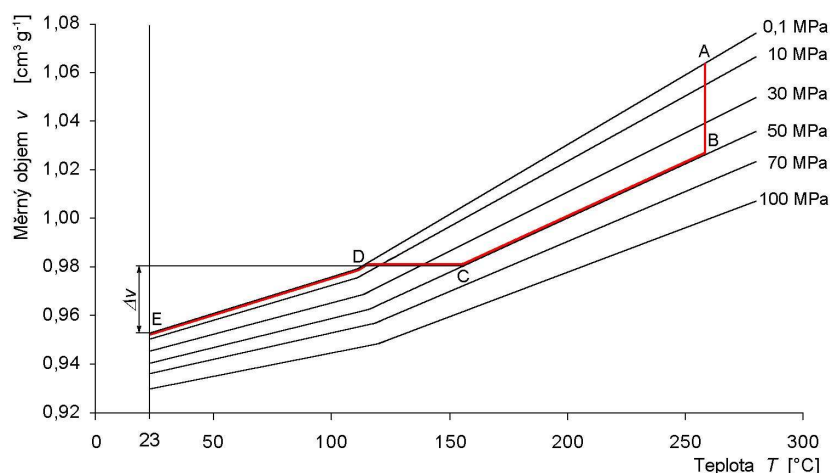
kde  $S_L$  – lineární (délkové) smrštění [%],  
 $S_V$  – objemové smrštění [%].

Velikost objemového smrštění je dána vztahem

$$S_V = \frac{V_f - V_v}{V_f} \cdot 100 \quad (17)$$

kde  $V_f$  – objem dutiny formy při 23°C [m<sup>3</sup>],  
 $V_v$  – objem výstřiku při 23°C [m<sup>3</sup>].

Proces vstřikování je schématicky nakreslen v p-v-T diagramu amorfního termoplastu (ABS) na obr. 41.



Obr. 41: Schématické znázornění vstřikovacího cyklu v  $p$ - $v$ - $T$  diagramu ABS [26]

Pro odhad objemového smrštění je nutné znát stav průměrných hodnot základních termodynamických veličin v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku. Tento okamžik je v diagramu vyznačen bodem C. Mezi body A-B dochází ke vstřikování taveniny polymeru vysokou rychlostí do dutiny formy, přičemž pro zjednodušení předpokládáme izotermický průběh. Fáze dotlaku probíhá v oblasti mezi body B-C, pro zjednodušení je průběh izobarický. Při dotlaku dochází k ochlazení taveniny plastu. V bodě C dojde k zatuhnutí vtokového ústí a výstřik má už stejnou hmotnost jako při vyjímání z formy. Pro zjednodušení se předpokládá, že je současně ztuhlý celý objem výstřiku. Objem výstřiku je v úseku C-D konstantní a jeho velikost je dána:

$$V_f = m \cdot v_c \quad (18)$$

kde:  $v_c$  - měrný objem v bodě C  
 $m$  - hmotnost výstřiku

Hodnota tlaku ve výstřiku klesne na hodnotu atmosférického tlaku v bodě D. Měrný objem se mezi body C a D nemění. Poté začne s klesající teplotou klesat i měrný objem, který se ustálí při teplotě 23°C na velikosti  $v_E$ . Objem výstřiku  $V_E$  v bodě E je dán:

$$V_E = m \cdot v_E \quad (19)$$

kde:  $v_E$  - měrný objem v bodě E  
 $m$  - hmotnost výstřiku

Po dosazení objemů výstřiků v bodě C a E do rovnice 17 získáme tento vztah pro objemové smrštění:

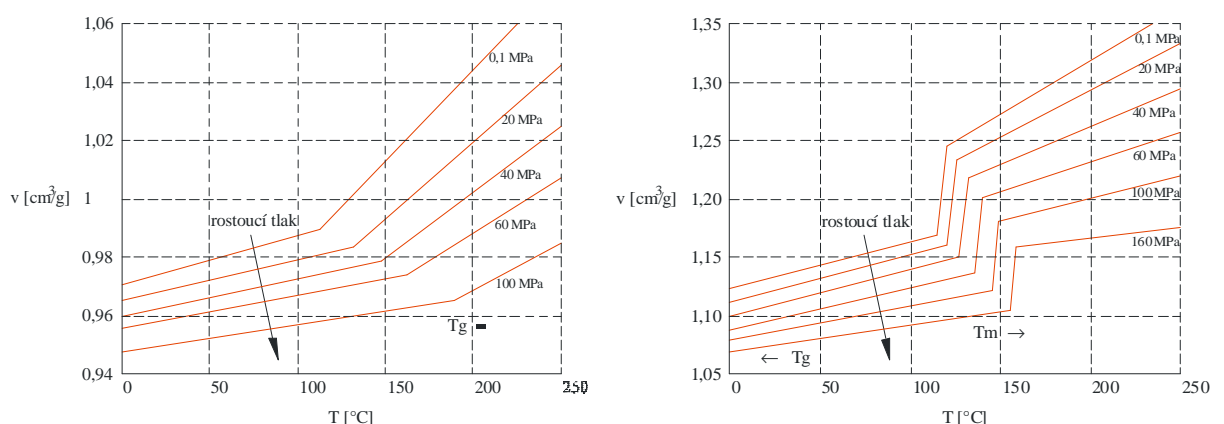
$$S_V = \frac{v_C \cdot m - v_E \cdot m}{v_C \cdot m} \cdot 100 = \frac{v_C - v_E}{v_C} \cdot 100 \quad (20)$$

Hodnoty měrných objemů potřebných k odhadu objemového smrštění se odečítají grafickou metodou přímo z p-v-T diagramů. K přepočtu délkového smrštění pomocí objemového smrštění použijeme rovnici 16. Velikost měrných objemů lze získat dosazením hodnot stavových veličin do stavové rovnice plastu, když tato rovnice je stanovena na základě p-v-T diagramu příslušného materiálu.

Odchytky od reálné velikosti smrštění při výpočtu může způsobit fakt, že v bodě C není celý objem výstřiku ztuhlý. Ve skutečnosti mohou být tlustší stěny ve svém jádru ještě plastické. Tato metoda odhadu smrštění může být použita i pro semikrystalické plasty, ale dochází zde k dalšímu možnému zkreslení výsledku odhadu kvůli obtížnému stanovení bodu C vzhledem k zlomu izobar na teplotě tání  $T_M$ .

### 2.6.1 Diagramy p-v-T [24, 35, 36]

Stavové děje probíhající uvnitř vstřikovací formy (tj. závislost měrného objemu na teplotě a tlaku) můžeme teoreticky popsat pomocí p-v-T diagramů. Diagramy p-v-T ukazují měrný objem plastu jako funkci teploty při různých konstantních hodnotách tlaku. Průběh izobar v diagramu je vázán na několik materiálových konstant a závisí tedy na druhu plastu. Významně se od sebe liší diagramy pro amorfnní a semikrystalické termoplasty (viz. obr. 42).



Obr. 42: Porovnání p-v-T diagramů vypočtených podle van der Waalsovi rovnice pro amorfnní termoplast vlevo (PS) a semikrystalický termoplast vpravo (PP) [36]

Skokový pokles měrného objemu během ochlazování semikrystalických plastů je způsoben fázovou přeměnou v oblasti teploty tání. Amorfni tavenina se přemění na částečně uspořádanou semikrystalickou strukturu s těsnějším uspořádáním makromolekul, což objasňuje větší smrštění semikrystalických plastů v porovnání s amorfními. Objemová smrštivost plastů může být určena teoreticky, jestliže známe p-v-T diagram polymeru a podmínky vstřikovacího procesu. K matematickému popisu závislosti p-v-T a k tvorbě diagramů lze použít následující modifikovanou stavovou van der Waalsovu rovnici:

$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R \cdot T \quad (21)$$

kde  $p$  [MPa] - vnější tlak,  
 $\pi$  [MPa] - vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě,  
 $v$  [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>] - měrný objem polymeru,  
 $\omega$  [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>] - měrný objem polymeru při 0K,  
 $T$  [K] - termodynamická teplota,  
 $R$  [kJ.(kg.K)<sup>-1</sup>] - materiálová konstanta polymeru obdobná individuální plynové konstantě.

Při aplikaci této stavové rovnice je nutné znát hodnoty  $R$ ,  $\omega$ , a  $\pi$ . Vlivem skokově se měnících vlastností plastů v závislosti na teplotě mají tři výše uvedené konstanty jiné hodnoty podle toho, ve které teplotní oblasti se polymer právě pohybuje. Proto i přímky představující izobary v souřadnicích měrný objem – teplota v závislosti na teplotě vykazují zlomy. Tyto zlomy jsou vázány na přechodové teploty. U amorfních termoplastů rozlišujeme oblast nad a pod  $T_g$ . U semikrystalických plastů je pak nutno při výpočtech rozlišovat oblasti čtyři, a to oblast pod  $T_g$ , pak oblast nad  $T_g$  až do teploty asi 40 °C pod  $T_m$ , další oblastí je rozmezí teplot 40 °C pod  $T_m$  až k hranici  $T_m$  a poslední oblastí je teplotní pásmo nad  $T_m$ .

Díky ostrým zlomům izobar neodpovídá van der Waalsova rovnice přesně realitě, a proto se používá přesnější rovnice Taitova. Zde jsou přímky izobar mírně zaobleny tak, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. Rovnici hojně využívají také simulační programy pro výpočet objemu jako funkce tlaku a teploty při smršťování hmoty v dutině nástroje během fáze dotlaku. Rovnice má následující tvar:

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (22)$$

dále platí:

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{př} \quad (24)$$

kde

$p$  [Pa] značí tlak,

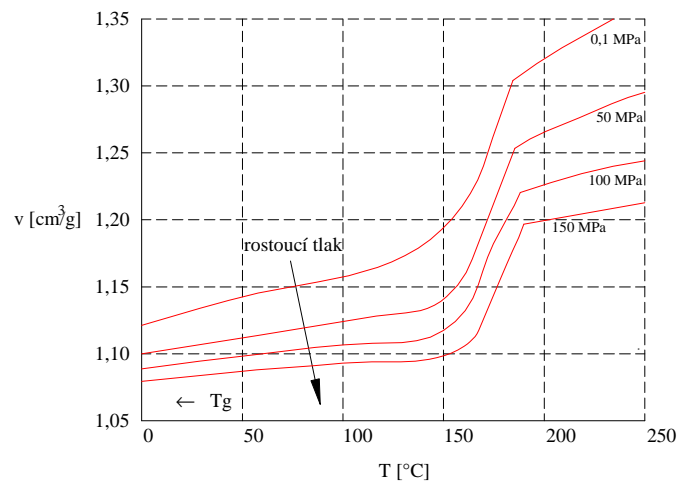
$v$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] měrný objem polymeru,

$T$  [K] je termodynamická teplota,

$T_{př} = b_5 + b_6 \cdot p$  je přechodová teplota,

$\bar{T} = T - b_5$ ,  $C = 0,0894$  je univerzální konstanta

$b_i$  jsou materiálové konstanty pro daný polymer zjistitelné z příslušných materiálových listů.



Obr. 43: Diagram  $p$ - $v$ - $T$  pro polypropylén vycházející z Taitovy rovnice [36]

## 2.6.2 Počítačová simulace [37, 38, 39]

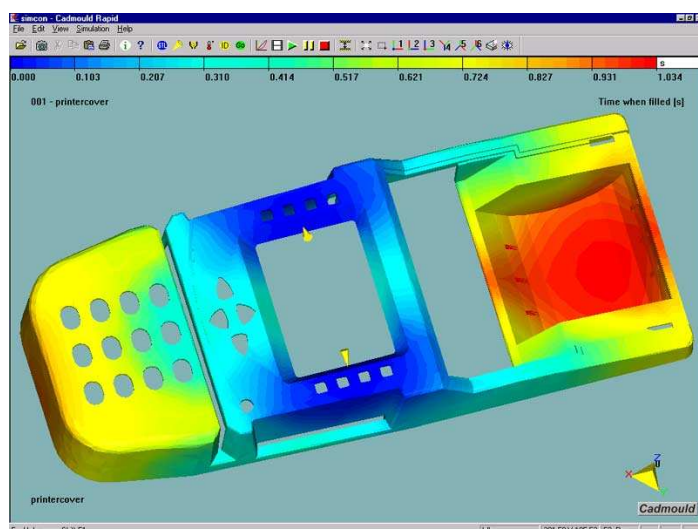
Dnešní simulační programy se podílejí nejen na odhalování chyb a nedostatků konstrukcí plastových dílců a konstrukcí forem, ale pomáhají také stanovit optimální technologické parametry či získat výpočtové podklady pro návrh opatření, vedoucích k minimalizaci technických rizik, ke snížení doby výrobního

cyklu a mnohem přesnějším stanovení výrobních nákladů. Díky možnostem počítačové simulace lze optimalizovat vhodné umístění vtoků, odstranění studených spojů či jiných vad. Kromě toho lze sledovat různé děje během samotného procesu vstřikování, jako chování plastu při plnění dutiny formy, rozložení teplotního pole ve výstřiku, stav vnitřního napětí a deformací ve výlisku po vyhození z nástroje, vznik problematických míst a s tím souvisejících vad a mnoho dalších. Mezi výhody softwarové simulace patří možnost prověření různých variant řešení, kdy změnou technologických a konstrukčních parametrů lze sledovat jejich vlivy na chování celého procesu a vyloučit tak rizika špatných návrhů.

#### **2.6.2.1 Software Cadmould [39, 45, 46]**

Procesní simulace Cadmould patří mezi jeden z nejdokonalejších CAE softwarů pro simulaci zpracování termoplastů, elastomerů, reaktoplastů a RIM materiálů. Byl vyvinut německou firmou Simon GmbH, která se problematikou simulačních procesů zabývá přes 20 let své existence. Moduly programu Cadmould poskytují uživateli prostředky pro optimalizaci technologického procesu vstřikování, možnost zkrácení doby vývoje nových výrobků, zvýšení kvality forem a plastových dílců. Základním formátem počítačových dat, využívaným simulační analýzou Cadmould, je STL. Do tohoto formátu se převede konstrukce dílce, která byla určena k výpočtu. STL je výchozím podkladem pro automatickou tvorbu speciální výpočtové sítě konečných prvků, kterou má firma Simcon přihlášenou k patentové ochraně. Při importu STL dat je nutné se vyvarovat chyb, které by mohly simulační výpočet zkreslit (patří sem chyby v podobě nespojitosti sítě modelu, překrývání a protínání elementů sítě, mnoho příliš malých nebo příliš deformovaných trojúhelníkových elementů, hrubá síť elementů, vnořené falešné sítě do základní konstrukce či nesprávně připojená žebra a nálitky). Po zadání polohy vtoků, výběru technologických a materiálových parametrů zpracuje Cadmould simulační analýzu. Výpočet je vícevrstvý, teplotně závislý a bere v úvahu i takové věci jako je smykové ztenčení proudu či stlačitelnost materiálu.





Obr. 44: Pracovního prostředí softwarového produktu Cadmould [45]

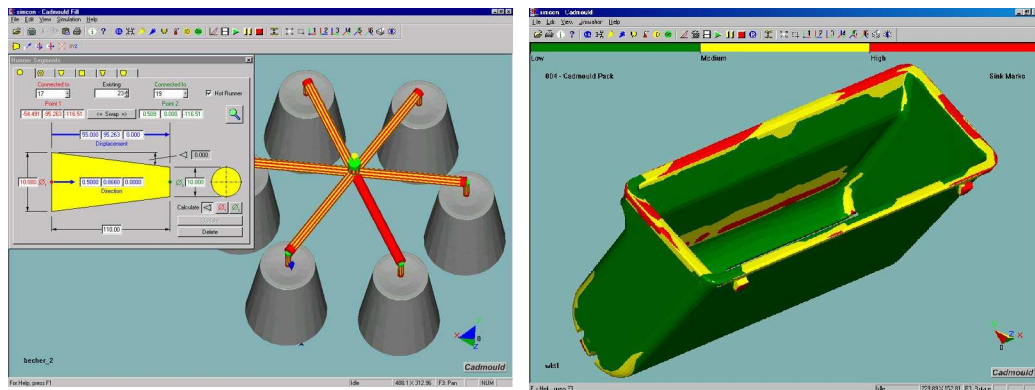
Uživatelské rozhraní programu Cadmould je řešeno pomocí systému oken. Přes konkrétní položky v menu záhlaví programu, či aktivací pomocí ikon lze předat všechny potřebné údaje do preprocesoru, postprocesoru a výpočtových modulů. Preprocesor slouží k přípravě výpočtové geometrie výstřiku, umožňuje načíst nejrozličnější přenosové formáty (\*.iges, \*.stl atd.). Vytváří výpočtovou strukturu složenou z trojúhelníkových a válcových segmentů. Dokáže provést simulaci plnění a dotlačkové fáze, umožňuje zvolit polohu vtokového ústí a matematicky upravovat tloušťky stěn. Mezičlánkem preprocesoru a postprocesoru je samostatný procesor, který plní funkci rychlého výpočtu vlastních simulačních výsledků. Postprocesor představí vypočtené simulační výsledky pro celý výrobek nebo pro zvolené sledované oblasti a to převážně v grafické podobě včetně barevných vyjádření průběhu a stavu proměnlivých hodnot. Simulační program Cadmould umí rovněž zohlednit horké vtokové systémy a několik různých variant druhů temperace vstřikovacího nástroje. V neposlední řadě software obsahuje rozsáhlou materiálovou databanku plastů, kterou lze libovolně rozšiřovat např. pomocí databáze CAMPUS obsahující více jak 7000 typů materiálů.

### Výpočtové moduly procesní simulace

Celý simulační systém je řešen modulově a mezi hlavní moduly patří:

- Cadmould Fill
- Cadmould Pack
- Cadmould Cool

- Cadmould Warp



Obr. 45: Prostředí modulů Cadmould Fill a Cadmould Pack [45]

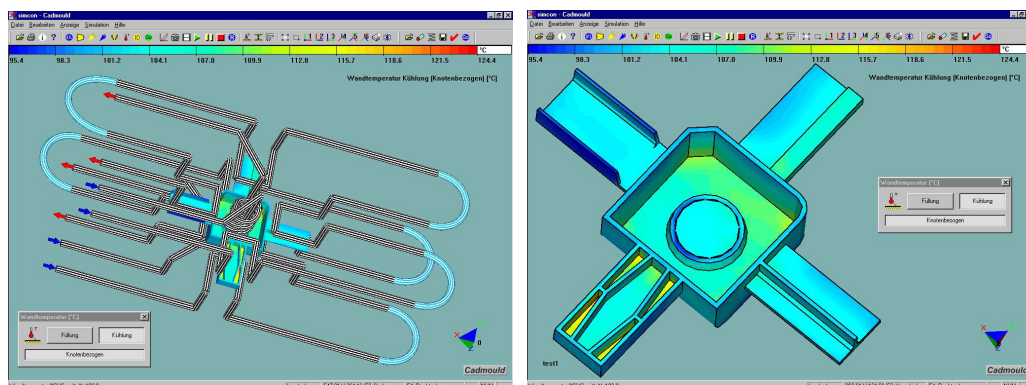
Každý modul má většinou společné pracovní prostředí a specifické dialogové okno. Modul může sloužit například k zadávání procesních parametrů či ke grafickému zobrazování výsledků simulačních výpočtů.

Modul Cadmould Fill je základním prvkem pro načtení modelu výstřiku ve formátu \*.stl. Pomocí modulu lze provést konstrukci vtokového systému (studeného / horkého), dále změřit či změnit tloušťky stěn a umožňuje kopírování modelů výstřiků pro vytvoření násobnosti formy. Obsahuje rozsáhlou interní databanku plastů s možností externího rozšíření připojením na rozhraní materiálové databáze CAMPUS. Provádí analýzu plnění tvarové dutiny vstřikovací formy včetně analýzy kompletního vtokového systému.

Modul Cadmould Pack rozšíří systém o podrobnější analýzu při dotlakové fázi vstřikovacího cyklu. Modul umožňuje profilování fáze dotlaku a nastavení optimálního vstřikovacího cyklu.

Modul Cadmould Fibber umožňuje souběžné simulační výpočty orientace krátkých nebo dlouhých vláken a makromolekul u anizotropních materiálů během plnicí a dotlakové fáze vstřikovacího cyklu.

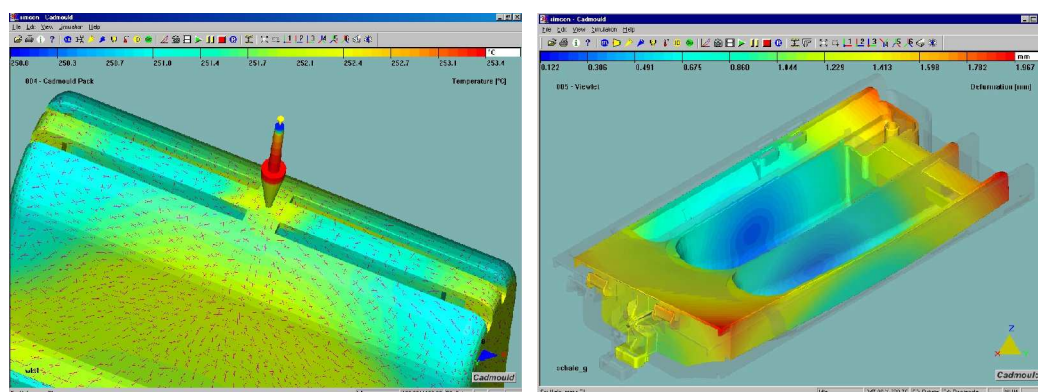
Rozšířením systému o modul Cadmould Cool získává uživatel prostředky pro konstrukci temperačních kanálů nezávisle na CAD, výpočty rozložení teplot na povrchu tvarových dutin pro plnicí a chladicí fázi vstřikovacího procesu, výpočty středních temperačních teplot a objemového proudění.



Obr. 46: Prostředí modulu CadMould Cool [45]

Pomocí modulu Cadmould Warp lze provést výpočty zpracovatelského smrštění a deformace plastového dílce vychladlého až na teplotu okolního prostředí. Pro výpočet modul přebírá výsledky tlakových průběhů simulace dotlakové fáze, rozložení teplotního pole v nástroji a v neposlední řadě i orientaci vláken ze simulačního procesu plnění.

Spolehlivost vypočítaných simulačních výsledků závisí nejen na kvalitě použitého softwaru, ale také na zodpovědné přípravě podkladů, které může zadavatel analýzy ovlivnit. Je zcela zřejmé, že se kvalita vstupních údajů použitých při výpočtu projeví na přesnosti výsledku simulačního procesu. Mezi důležité části celé analýzy tedy patří tvorba a příprava modelu (včetně vytvoření a úpravy výpočtové sítě konečných prvků), volba vtokového systému a volba temperačního systému (jeho konstrukce a umístění vzhledem k modelu výstřiku). Dále jsou to materiálová data, informace o parametrech vstřikovacího stroje a údaje o vstřikovacím cyklu.



Obr. 47: Prostředí modulů Cadmould Fibber a Cadmould Warp [45]



V současné době přichází firma Simon GmbH na trh s novou verzí simulačního balíku Cadmould 3D-F, který nabízí uživatelům nové automatické funkce a to optimalizaci technologických parametrů, optimalizaci poloh vtokových ústí v oblasti zvolených ploch apod. Vývoj automatických funkcí probíhá v rámci EU projektu "Virtual Injection Moulding" (VIM), na kterém spolupracuje mnoho evropských firem a výzkumných institutů.

Software Cadmould je kompatibilní s verzí operačních systémů Windows® NT/2000/XP.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Záměr experimentálních prací

Hlavním záměrem u experimentálních prací bylo získat poznatky o vlivu technologických podmínek na rozměrové změny finálního výrobku vyrobeného z vybraných materiálů. Výsledky práce by tedy měli umožnit nalézt optimální postup při nastavování technologických parametrů vstřikovacího cyklu a množství nanokoncentrátu s cílem předpovídat a ovlivnit tak smrštění výstřiků.

Při výběru materiálu byl zvolen jako termoplastická matrice nanokompozitu jeden z nejčastěji používaných materiálů nejen pro technické díly – polypropylén. Jednalo se o homopolymer pro víceúčelové použití MOSTEN GB 005 a blokový kopolymer MOSTEN GB 506. K těmto materiálům byl přimícháván v určitém hmotnostním poměru nanokoncentrát Nanoblend 1201 firmy PolyOne Corporation. S kombinací těchto materiálů již začíná experimentovat mnoho firem zabývajících se výrobou technických dílců pro automobilový průmysl.

Převážná část experimentu této práce se zabývá měřením výrobního smrštění na výstřicích ve tvaru desky s různou tloušťkou vyrobených za různých technologických parametrů. Zbytek experimentu pak tvoří softwarová simulace technického dílce, kdy jsou při vlastní simulaci využita získaná naměřená data. Vzhledem k mnoha faktorům, které ovlivňují výrobní či dodatečné smrštění výrobků z termoplastů, je tato práce zaměřena pouze na zjištění vybraných technologických faktorů, které by se měli podílet na výrobním smrštění zásadním dílem a ovlivňovat tak jeho velikost.

Cíle pro experimentální část předkládané práce lze tedy shrnout do následujících bodů:

- Pro provádění experimenty vybrat kombinace proměnných materiálových, konstrukčních a technologických parametrů tak, aby rozsah experimentu nebyl příliš široký a aby pokud možno byly vyhodnoceny největší vlivy na velikost výrobního smrštění.

- Pro jednotlivé hmotnostní kombinace polypropylenové matrice a nanokoncentrátu určit vliv základních technologických parametrů na výrobní smrštění zkušebních těles o různé tloušťce.
- Stanovit vliv obsahu nanokoncentrátu na velikost výrobního smrštění. Dále pak posoudit vliv obsahu nanokoncentrátu na anizotropii vlastností.
- Pomocí faktorové analýzy rozptylu statisticky vyhodnotit vliv jednotlivých faktorů na velikost výrobního smrštění.
- Pro vybraný materiál a podmínky vstřikování provést analýzu procesu vstřikování a výrobního smrštění pomocí simulačního programu Cadmould. Pro softwarovou simulaci zvoleného technického dílce použít materiálová data jako vstupní data.

Postup řešení, výsledky experimentálních prací a diskuze výsledků jsou uvedeny v následujících kapitolách.

## 3.2 Charakteristika zkoušených materiálů

### 3.2.1 Polypropylén [50]

Polypropylén je ve stále větším měřítku používán nejen pro výrobu spotřebního zboží, ale také jako materiál používaný pro realizaci technických dílů. V technologii vstřikování patří k nejdůležitějším druhům plastických hmot. Pro uskutečnění experimentu potřebného k zjištění závislostí materiálových a technologických parametrů na velikost smrštění byly vybrány dva představitelé polypropylénu. Prvním z nich je materiál Polypropylén Mosten GB 005. Je to homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností a je určen pro víceúčelové použití. Je vhodný jak pro vstřikování, tak i k výrobě fólií pro následné tvarování. Jeho typické vlastnosti naleznete v příloze v materiálovém listě.



Obr. 48: Granule materiálu Mosten GB 005



Druhým vybraným představitelem polypropylénů je materiál Polypropylén Mosten GB 506 – blokový kopolymer určený pro vstřikování technických dílů a součástí s nároky na vysokou houževnatost. Může být použit jako matrice pro výrobu nejrůznějších kompaundů zejména pro potřeby automobilového průmyslu. Zpracován může být technologií vstřikování, jeho použití je vhodné i u výroby koextrudovaných fólií určených pro tvarování.



Obr. 49: Granule Mostenu GB 506

Oba dva materiály pocházejí z produkce akciové společnosti Chemopetrol, která již řadu let patří mezi jednu z nejvýznamnějších petrochemických společností v České republice. Patří ke klíčovým dodavatelům produktů k dalšímu zpracování zejména v chemickém průmyslu, ale také v plastikářském a farmaceutickém. Vybraní představitelé polypropylénů materiály Mosten GB 005 a Mosten GB 506 sloužili v rámci experimentu jako základní termoplastická matrice, ke které byly v určitém poměru přidány nanočástice v podobě Nanoblend koncentrátu.

### 3.2.2 Nanoblend 1201 [49]

Nanoblend koncentráty jsou vysoce kvalitní materiály založené na nanokompozitních technologiích. Nanoblend 1201 pochází z distribuce firmy PolyOne Corporation. Díky svým vlastnostem se Nanoblend koncentráty používají především v automobilovém průmyslu, dále pak při výrobě obalových fólií, lékařského vybavení, v elektrotechnice (obaly kabelů a izolace drátů) a v ostatních náročných aplikacích. Úspěšně lze tyto materiály používat v rozdílných technologických procesech včetně vstřikování, vytlačování či vyfukování.

Koncentráty Nanoblend zlepšují fyzikální vlastnosti polymerní matrice a mohou redukovat obsah přísad potřebných k dosažení požadovaných výhod.

Přispívají tím i k redukci celkové váhy porovnáním s tradičními materiály. Plně tedy nahrazují tradiční minerální a skleněná plniva či přísady zabraňující hoření. Koncentráty Nanoblend patří mezi systémy typu polymer-jíl. Jedná se o rozptýlené nanočástice v polymerním jílu, které v celkovém množství tvoří přibližně 40 hmotnostních procent Nanoblend koncentrátu. Je dodáván ve formě granulátu. Firma PolyOne Corporation úzce spolupracuje s firmou Nanocor, jedním z největších výrobců nanojílu nejen pro plastikářský průmysl.



Obr. 50: Granulovaný Nanoblend 1201

Mezi výhody při použití patří jednak příznivý poměr hmotnosti a ceny, odolnost proti hoření, zlepšení odolnosti vůči chemikáliím a navlhavosti. Při použití dosáhneme kvalitního povrchu a zvýšeného lesku. Dále pak dosáhneme zlepšení mechanických vlastností - zvýšení tuhosti, pevnosti, tvrdosti. Materiálový list Nanoblend 1201 firmy PolyOne Corporation je uveden v příloze 2.



Obr. 51: Rozdíl mezi hořením PP bez Nanoblendu (vlevo) a s Nanoblendem 1201 (vpravo)

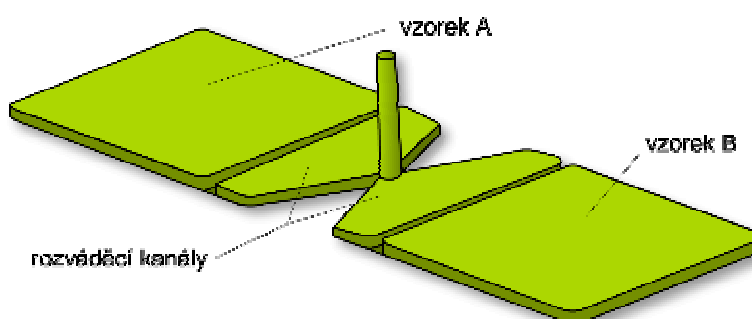
Při zpracování technologií vstřikování lze použít standardní stroj pro zpracování polyolefinů. Technologické podmínky vstřikování nejsou nijak závislé



na hmotnostním obsahu nanokoncentrátu v termoplastické matrici. Pouze vstřikovací teplota nesmí překročit 250°C, neboť potom by došlo k tepelné degradaci nanokompozitu. Nanoblend koncentráty jsou připraveny s nízkým obsahem vlhkosti a není nutno je před zpracováním sušit. Jestliže by byl materiál vystaven dlouhodobé zvýšené vlhkosti (např. během skladování), stačí použít rychlé sušení povrchu přibližně o teplotě 80°C po dobu 1 hodiny. Lze jej recyklovat a množství přidaného recyklovaného materiálu do 20 % by nemělo negativně ovlivnit původní vlastnosti nanokompozitu.

### 3.3 Vstřikovací stroj a nástroj [44]

K porovnání výrobního smrštění byly použity výstřiky ve tvaru desek (viz. obr. 52). Desky byly vstřikovány ve dvou rozdílných tloušťkách a to 2 a 4 mm. Všechny výstřiky byly zhotoveny v univerzálním nástroji, který má výměnnou desku s tvarovými dutinami.



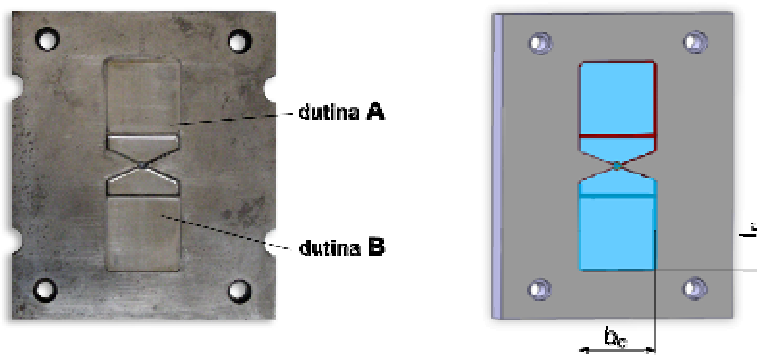
Obr. 52: Vstřikovaná zkušební tělesa s vtokovou soustavou [44]

Zkušební tělesa tvaru desky odpovídající tloušťky byly vyrobeny ve dvounásobné vstřikovací formě s filmovým ústím vtoku. Rozměry jednotlivých ústí vtoku pro jednotlivé tloušťky desek naleznete v následující tabulce 3.

Tab. 3: Tloušťky filmového ústí u používaných forem.

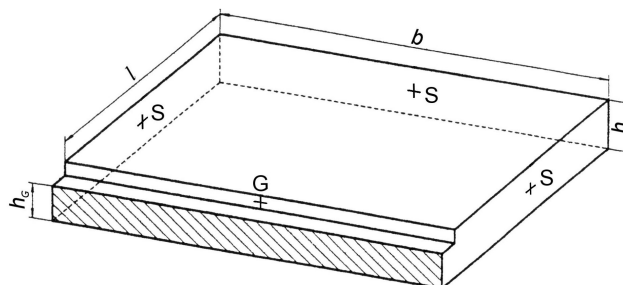
tloušťka stěny desky	tloušťka filmového ústí vtoku
2 mm	0,6 mm
4 mm	1,2 mm

Jednotlivé části dvounásobné dutiny formy byly označeny písmeny A a B (viz obr 53).



Obr. 53: Dvounásobná forma pro výrobu 2 mm zkušebních vzorků

Skutečné rozměry tvarových dutin forem pro jednotlivé zkoušky byly změřeny výrobcem forem v referenčních bodech s přesností na 0,01 mm. Měření probíhalo při ustálené pokojové teplotě 23°C a to jak ve směru podélném (shodný směr toku taveniny v dutině formy), tak i ve směru příčném (kolmém na tok taveniny v dutině formy). Referenční body ve formě (viz. obr. 54) byly zvoleny dle normy ČSN EN ISO 294-4 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění. Hodnoty naměřených velikostí dutin forem uvádí tab. 4.



Obr. 54: Perspektivní zobrazení zkušebního tělesa  
tvaru vstřikované desky [44]

Tab. 4: Rozměry použitých dutin

Rozměry dutin forem			
tloušťka stěny	dutina formy	směr	velikost
2 mm	A	podélný	50,03 mm
		příčný	50,00 mm
	B	podélný	49,96 mm
		příčný	50,03 mm
4 mm	A	podélný	50,02 mm
		příčný	50,00 mm
	B	podélný	49,99 mm
		příčný	49,99 mm

Zkušební tělesa byla vyrobena na šnekovém vstřikovacím stroji Engel AG typ ES 25/50 (viz. obr. 55). Měření bylo provedeno v lisovně plastů katedry strojírenské technologie.



Obr. 55: Vstřikovací stroj Engel ES 25/50

Vybrané technické parametry stroje jsou uvedeny v následující tab. 5.

Tab. 5: Technické parametry vstřikovacího lisu Engel ES 25/50

Technické parametry ENGEL 25/50	Jednotky	Hodnoty
Průměr šneku	mm	25
Zdvih šneku	mm	85
Otáčky šneku (normální)	min <sup>-1</sup>	50 - 130
Otáčky šneku (zrychlené)	min <sup>-1</sup>	50 - 260
Plastikační výkon	g.s <sup>-1</sup>	4
Vstřikovaná kapacita	cm <sup>3</sup>	35
Maximální vstřikovací tlak	MPa	140
Uzavírací síla	kN	300
Průměr šneku	mm	25
Maximální výška formy	mm	242
Minimální výška formy	mm	152

### 3.4 Volba parametrů experimentu

#### 3.4.1 Materiálové parametry

Za první materiálový parametr lze považovat rozdílnou termoplastickou matici nanokompozitu. V obou případech experimentu se jednalo o polypropylén, avšak v prvním případě byl zvolen homopolymer polypropylénu Mosten GB 005 a druhým materiálem byl zvolen blokový kopolymer polypropylénu Mosten GB 506. Oba materiály jsou hojně používány v praxi při výrobě technických dílů, kde jsou plněny rozdílnými plnivy.

Dalším materiálovým parametrem bylo procentuální zastoupení koncentrátu Nanoblend 1201 v celkovém množství měřeného nanokompozitu. Pro potřeby experimentálního měření byly předem navázeny potřebné směsi Mostenu s koncentrátem Nanoblend 1201 a to ve třech kombinacích - se 2, 4 a 6 hmotnostními procenty obsahu nanočástic v nanokompozitu. Rozsah obsahu nanokonzentrátu použitý při experimentu odpovídá běžně užívanému množství

v technické praxi. Zahrnutí dalších hodnot obsahu nanokoncentrátu v nanokompozitu by značně zvýšilo počet měření v experimentu.

Příkladem značení připravených materiálů v práci může být např. „Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201“. Název tedy obsahuje jasné označení použitých materiálů a velikost obsahu nanokoncentrátu.

### 3.4.2 Konstrukční parametry

Následujícím parametrem experimentu byla z konstrukčních faktorů zvolena velikost tloušťky stěny zkušebního tělesa. Tloušťka stěny desky byla zvolena ve dvou úrovních – 2 a 4 mm. Zvolené rozmezí rozměrů tloušťky desek 2 až 4 mm by mělo odpovídat rozmezí velikostí tloušťek většiny technických dílců. Je třeba poznamenat, že tloušťka vtokového ústí byla pro jednotlivé tloušťky stěn zkušebních těles rozdílná (viz. tab. 3), ale vzhledem ke vzájemnému konstantnímu poměru těchto veličin lze předpokládat minimální vliv rozdílné tloušťky vtokového ústí stěny na velikost výrobního smrštění.

### 3.4.3 Technologické parametry

Při vstřikování plastů se uplatňuje řada technologických veličin, z nichž se každá svým způsobem podílí na finálních vlastnostech výrobku (viz. kap. 2.5.1). Mezi technologické parametry při vstřikování plastů patří:

- Teplota taveniny
- Teplota formy
- Vstřikovací tlak
- Dotlak
- Doba dotlaku
- Doba plnění formy
- Doba chlazení výstřiku ve formě

Vliv jednotlivých veličin nelze posuzovat izolovaně, protože spolu navzájem souvisí a ve svých účincích se buď doplňují anebo si odporují.

Pokud bychom chtěli experimentem pokrýt všech 7 technologických parametrů při všech vzájemných kombinacích, obsahovala by úplná faktorová analýza pro 7 faktorů na 3 úrovních  $3^7 = 2187$  pokusů. Z důvodů snížení rozsahu

experimentálního měření byly z technologických parametrů vybrány a měněny v průběhu experimentu pouze dva faktory – teplota taveniny a teplota formy. Změna hodnot těchto dvou vybraných technologických faktorů by měla výrazně ovlivňovat velikost výrobního smrštění měřených vzorků.

### ***Teplota taveniny***

Teplota taveniny přímo ovlivňuje viskozitu roztavené hmoty a následně i výši a průběh tlaku a dotlaku ve formě a dobu chlazení. Proto je nutno ji udržovat na konstantní hodnotě pomocí automatických regulátorů, které dostávají údaj z teplotního čidla. Měření teploty přímo v tavenině by sice bylo ideální, ale v provozních podmínkách nebyl tento problém dosud uspokojivě vyřešen. Teplota taveniny byla měněna na třech úrovních a rozsah nastavených teplot taveniny pokryl pásmo zpracovatelských teplot udávaných výrobcí materiálů. Teplota taveniny byla nastavována na vstřikovacím stroji Engel 25/50 v hodnotách 200°C, 220°C a 240°C.

### ***Teplota formy***

Teplota formy ovlivňuje zabíhavost taveniny ve formě, a tedy rychlost plnění dutiny formy, rychlost ochlazování výrobku, tzn. dobu chlazení a tím i dobu trvání cyklu a konečně i náklady na výrobu. Z ekonomického hlediska by bylo žádoucí volit teplotu formy co nejnižší, aby se vstřikovací cyklus co nejvíce zkrátil, avšak z hlediska technologie i vlastností výrobku by naopak měla být co nejvyšší. V praxi se u běžných termoplastů volí teplota v rozmezí mezi 30 až 80°C. V rámci experimentálního měření nabývaly teploty formy 3 hodnot – 20, 40 a 60°C. Teplota formy byla regulována nepřímo pomocí temperačního agregátu TA3 (viz. obr. 56).



*Obr. 56: Temperační agregát TA3*

Toto zařízení je schopno temperovat vstřikovací formy vodou do 95°C. Vytápění nerezové vany agregátu s vodou je zabezpečeno jedním topným tělesem o výkonu 3kW. Chlazení je zajištěno chladícím šnekem s oběhem studené vody a regulace topení je pomocí regulátoru s PID řízením. Výkon čerpadla činí 60l/min, objem nádrže je 5l.

Zbylé technologické parametry byly pro všechny části experimentu konstantní a jejich hodnoty byly nastaveny dle následujícího postupu:

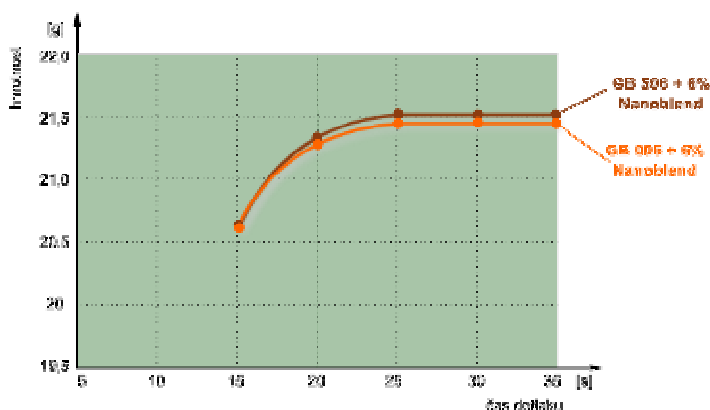
### ***Vstřikovací tlak, dotlak***

Optimální vstřikovací tlak závisí na teplotě taveniny, přesněji na její viskozitě, a dále na délce toku taveniny ve formě, na tloušťce stěny a členitosti výstřiku. Zaplnění formy musí proběhnout dostatečně rychle, protože je třeba předejít přílišnému zchladnutí a předčasnému ztuhnutí hmoty. Dotlak patří mezi veličiny, které mají velký vliv na tzv. vnitřní stav výstřiku, kterým se myslí struktura výrobku, stupeň orientace makromolekul, vnitřní pnutí a další. V rámci experimentu byla z důvodu omezení chybného přepnutí vstřikovacího tlaku na následný dotlak zvolena shodná hodnota vstřikovacího tlaku a dotlaku. Velikost těchto tlaků byla nastavena na vstřikovací stroji Engel 25/50 na hodnotu 40 MPa. Obdobné velikosti dotlaků se používají běžně v praxi pro vstřikování polypropylenu.

### ***Doba dotlaku***

Dobu chlazení výstřiku ve formě překrývá dobu dotlaku. Výše trvání má být v souladu s probíhajícím chladnutím hmoty a s jejím smršťováním. Vyšší dotlak a jeho prodlužování až do určité meze dané okamžikem zatuhnutí vtoku má za následek zvětšování rozměrů a hmotnosti výstřiku, ale i vyšší stupeň orientace makromolekul zvláště v blízkosti ústí vtoku, neboť ve fázi dotlaku má chladnoucí tavenina již poměrně vysokou viskozitu. Prodlužování dotlaku za okamžik zatuhnutí vtoku je bezúčelné. Je-li naopak dotlak ukončen před zatuhnutím vtoku, je nebezpečí vzniku propadlin nebo vnitřních dutin ve výstřiku. V tomto případě je také nutno počítat se zpětným tokem materiálu z dutiny formy k trysce. Při určování doby dotlaku pro experiment byla zvolena za rozhodující kritérium maximální hmotnost výstřiku při dané kombinaci parametrů vstřikování. Při vstřikování zkušebního tělesa o tloušťce 4 mm byly nastaveny nejvyšší parametry

teploty taveniny a teploty formy ( $T_t = 240^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 60^\circ\text{C}$ ) a následně byla postupně měněna doba dotlaku. V momentě, kdy přestane hmotnost výstřiku záviset na době dotlaku, získáme hodnotu zatuhnutí vtokového ústí (viz. obr. 57).



Obr. 57: Stanovení doby zatuhnutí vtokového ústí

Pro všechny varianty experimentu byla zvolena celková doba vstřiku a dotlaku konstantní a to 25 sekund. Pro tloušťku zkušebních desek 2 mm by samozřejmě postačovala nižší hodnota dotlaku, ale při zachování stejné doby chlazení by tavenina plastu byla delší dobu v tavící komoře stroje po skončení plastikace a mohlo by tím dojít k rozdílným vlastnostem vstřikované taveniny plastu.

### ***Doba plnění formy***

Doba plnění formy je závislá na rychlosti vstřikování a celkovém objemu výstřiku. Postupná rychlost čela taveniny má být během fáze plnění konstantní, aby proudění bylo rovnoměrné a ztráty tlaku byly minimální. U jednoduchého výstřiku s konstantní tloušťkou stěny to vyžaduje dodržet přibližně konstantní rychlost posuvu šneku vpřed. Rychlost vstřiku vyjádřená rychlostí posuvu šneku byla nastavena konstantní pro všechny části experimentu na hodnotu  $7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### ***Doba chlazení výstřiku ve formě***

Doba chlazení se volí taková, aby měl výstřik při vyjímání z formy teplotu, při které bude mít dostatečnou tuhost a je tedy závislá na teplotě taveniny, teplotě formy a účinnosti odvodu tepla z formy temperačním médiem. Doba chlazení výstřiku byla nastavena shodně ve všech částech experimentálního měření na hodnotu 10 sekund. Po uplynutí této doby byl výstřik i při nastavení nejvyšších



teplot taveniny a formy dostatečně tuhý a nedocházelo k deformacím při jeho vyjímání z formy.

Celková doba cyklu, včetně doby manipulace, byla nastavena pro všechny části měření shodně na 50 s.

V následující tabulce (tab. 6) naleznete použité hodnoty většiny technologických parametrů.

*Tab. 6: Nastavení technologických parametrů*

Přehled nastavení technologických parametrů při experimentu			
Teplota taveniny	200°C	220°C	240°C
Teplota formy	20°C	40°C	60°C
Vstřikovací tlak	40 MPa		
Dotlak	40 MPa		
Doba vstřiku a dotlaku	25 s		
Doba chlazení výstřiku ve formě	10 s		
Doba cyklu	50 s		

### 3.5 Stanovení smrštění výstřiků [44]

Pro stanovení velikosti smrštění byla použita metodika a výpočtové vztahy formulované normou ČSN EN ISO 2994 - 4 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění. Tato norma je českou verzí evropské normy EN ISO 294 – 4: 1998 a byla schválena 12.6.1998 CEN - Evropskou komisí pro normalizaci. Norma ČSN EN ISO 2994 – 4 specifikuje metodu stanovení výrobního smrštění a dodatečného smrštění vstřikovaných zkušebních těles z termoplastů ve směru rovnoběžném a ve směru kolmém ke směru toku taveniny v dutině formy. Nezahrnuje však vlivy sorpce vlhkosti na výrobní smrštění (tuto problematiku zahrnuje ISO 2577).

### 3.5.1 Stanovení výrobního smrštění

Výrobní smrštění – značeno  $S_M$  – je rozdíl mezi rozměry suchého zkušební tělesa a rozměry tvarové dutiny formy, v níž bylo zkušební těleso vstřikováno. Rozměry formy i zkušební tělesa se měří při pokojové teplotě. Vyjadřuje se v procentech daného rozměru tvarové dutiny formy. Výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny ( $S_{Mp}$ ) se stanovuje ve středu šířky zkušební tělesa a výrobní smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny ( $S_{Mn}$ ) se stanovuje ve středu délky zkušební tělesa. Tedy při teplotě  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  se změří s přesností 0,02 mm délka  $l_c$  a šířka  $b_c$  tvarové dutiny mezi příslušnými referenčními body na protilehlých stranách (viz. obr. 54). Těmito body mohou být středy stran nebo středy hran nebo referenční značky vyryté v tvarové dutině formy. Rozměry dutin použitých forem lze nalézt v tab. 4.

Při teplotě  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  se změří délka  $l_1$  a šířka  $b_1$  zkušební tělesa mezi příslušnými referenčními body odpovídajícími téměř rozměrům tvarové dutiny formy, s přesností 0,02 mm. Měření těchto rozměrů je prováděno až po uplynutí 16 až 24 hodin.

Výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny ( $S_{Mp}$ ) a výrobní smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny ( $S_{Mn}$ ) jsou dány následujícími rovnicemi:

$$S_{Mp} = \frac{(l_c - l_1)}{l_c} \cdot 100 \quad (25)$$

$$S_{Mn} = \frac{(b_c - b_1)}{b_c} \cdot 100 \quad (26)$$

kde

- $l_c$  je délka ve středu tvarové dutiny [mm]
- $b_c$  je šířka ve středu tvarové dutiny [mm]
- $l_1$  je odpovídající délka zkušební tělesa [mm]
- $b_1$  je odpovídající šířka zkušební tělesa [mm]

### 3.5.2 Stanovení dodatečného smrštění

Dodatečné smrštění – značeno  $S_p$  – je rozdíl mezi rozměry vstřikovaného zkušební tělesa před dodatečnou úpravou a po ní. Rozměry jsou opět měřeny

při pokojové teplotě. Dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny ( $S_{Pp}$ ) a dodatečné smrštění ve směru kolmém ke směru taveniny ( $S_{Pn}$ ) jsou definovány obdobně jako u výrobního smrštění.

$$S_{Pp} = \frac{(l_1 - l_2)}{l_1} \cdot 100 \quad (27)$$

$$S_{Pn} = \frac{(b_1 - b_2)}{b_1} \cdot 100 \quad (28)$$

kde  $l_2$  je odpovídající délka zkušební tělesa po dodatečné úpravě [mm]  
 $b_2$  je odpovídající šířka zkušební tělesa po dodatečné úpravě [mm]

### 3.5.3 Stanovení celkového smrštění

Celkové smrštění – značeno  $S_T$  – je rozdíl mezi rozměry zkušební tělesa po dodatečné úpravě a rozměry tvarové dutiny formy, ve které bylo zkušební těleso vstříkováno. Celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny ( $S_{Tp}$ ) a celkové smrštění ve směru kolmém ke směru taveniny ( $S_{Tn}$ ) jsou definovány analogicky jako u smrštění výrobního.

$$S_{Tp} = \frac{(l_c - l_2)}{l_c} \cdot 100 \quad (29)$$

$$S_{Tn} = \frac{(b_c - b_2)}{b_c} \cdot 100 \quad (30)$$

kde použité symboly jsou definovány výše.

Vztah mezi výrobním, dodatečným a celkovým smrštěním je dán následující rovnicí:

$$S_T = S_M + S_P - \frac{S_P \cdot S_M}{100} \quad (31)$$

Je tedy patrné, že celkové smrštění není pouhý součet výrobního a dodatečného smrštění – výrobní a dodatečné smrštění nejsou vyjadřovány jako

procenta stejného výchozího rozměru. Poslední člen rovnice ( $\frac{S_P \cdot S_M}{100}$ ) lze však ve většině případů zanedbat.

### 3.6 Měření výrobního smrštění

Jak již bylo zmíněno, při měření výrobního smrštění nanokompozitů bylo postupováno dle normy ČSN EN ISO 2994 - 4 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – Část 4: Stanovení smrštění. Zkušební tělesa ve tvaru desek byla však jiných rozměrů. Na rozdíl od normy ČSN EN ISO 2994, kde se používá vstřikovací forma o rozměrech 60x60x2 mm, byly použity formy s velikostí tvarové dutiny 50x50x2 mm a 50x50x4 mm. Dále se měření odlišovalo od postupu stanoveném normou tím, že v tvarové dutině formy nebylo zabudováno tlakové čidlo.

Pro každou kombinaci materiálových, konstrukčních a technologických parametrů bylo vyrobeno nejméně 12 dvojic vzorků A a B (norma uvádí minimální počet 5 vzorků). Vstřikování zkušebních těles probíhalo při ustálených podmínkách vstřikovacího cyklu (vždy minimálně po předešlých deseti vstřikovacích cyklech). Každé zkušební těleso bylo okamžitě po otevření formy odříznuto od rozváděcího kanálu, aby tak bylo minimalizováno jeho borcení. Při výrobě zkušebních těles byla kontrolována pomocí bezdotykového měření pyrometrem teplota formy a teplota taveniny. Dále byl kontrolován vnější vstřikovací tlak a dotlak, doby vstřiku, dotlaku a chlazení. Sledované parametry byly udržovány v těchto tolerancích: teplota formy  $\pm 2$  °C, teplota taveniny  $\pm 2$  °C, vnější vstřikovací tlak a dotlak  $\pm 1$  MPa, doba vstřiku s dotlakem a doba chlazení  $\pm 1$  s. Vychladlá zkušební tělesa byla před měřením skladována při teplotě  $23 \pm 2$  °C po dobu 16 až 24 hodin.

Průměrná hodnota výrobního smrštění pro jednotlivé parametry byla spočtena z naměřených rozměrů prvních deseti vzorků vyrobených za ustálených vstřikovacích podmínek. Dva vzorky vyrobené navíc nahrazovali některý z prvních deseti vyrobených vzorků v případě odchylky rozměrů větší než 5% střední hodnoty příslušného rozměru.



*Obr. 58: Digitální úchylkoměr uchycený v měřícím přípravku*

Měření délkových rozměrů zkušebních těles bylo prováděno digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-F150 upevněném v měřícím přípravku (viz. obr. 58) s přímým importem naměřených dat do programu Excel MS. Digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-F150 lze měřit rozměry s přesností na 0,001 mm.



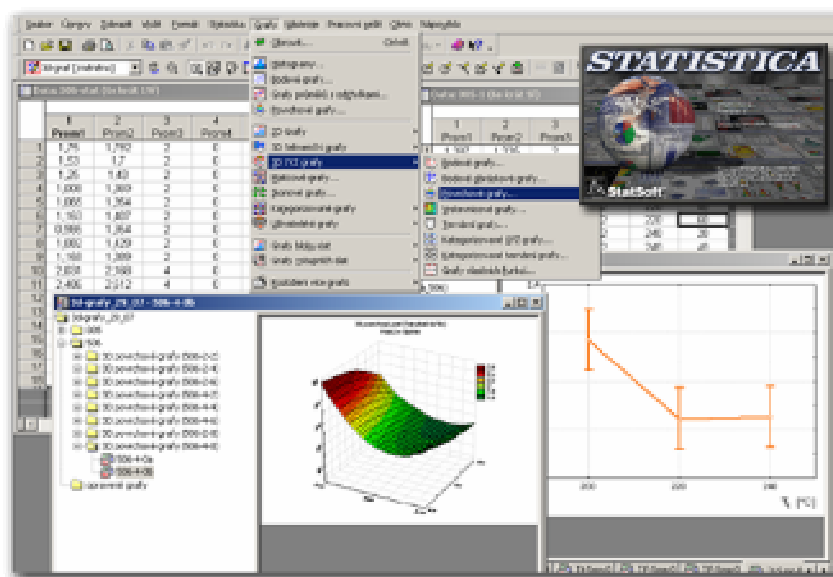
*Obr. 59: Schéma měřícího zařízení – digitální úchylkoměr propojený s notebookem*

Vzhledem k počtu možných kombinací materiálových, konstrukčních a technologických parametrů bylo v rámci této práce provedeno pouze měření výrobního smrštění nanokompozitů.

### **3.6.1 Statistické vyhodnocení naměřených dat**

Pro statistické vyhodnocení naměřených dat byla použita vícefaktorová analýza rozptylu ANOVA (Analysis of Variance). ANOVA je vícerozměrová technika k vyšetření vnitřních souvislostí a korelací a odhalení základní struktury zdrojové matice dat. Analýza rozptylu spočívá v rozkladu výběrového rozptylu na několik složek příslušících k jednotlivým uvažovaným zdrojům variability. Rozklad celkového rozptylu na složky má umožnit úsudky o vlivu jednotlivých faktorů, podle nichž je soubor roztříděn na sledovanou veličinu, jejíž napozorované hodnoty tvoří

náhodný výběr. Pro posouzení shody (odlišností) výsledků naměřených dat se nejčastěji používá Fischerovo kritérium. V případě, že je výsledná hodnota Fischerova kritéria pro daný faktor vyšší než kritická hodnota Fischerova rozdělení (na zvolené hladině významnosti a pro dané stupně volnosti), pak můžeme brát uvedený faktor jako statisticky významný. Veškeré statistické testy jsou provedeny na hladině významnosti  $\alpha = 5\%$ .



Obr. 60: Pracovního prostředí softwaru STATISTICA

Statistické vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno s pomocí softwaru STATISTICA firmy StatSoft. STATISTICA obsahuje širokou paletu statistik a možností a poskytuje obsáhlou sadu prostředků faktorové a hierarchické faktorové analýzy s rozsáhlými diagnostickými postupy a množstvím analytických a průzkumných grafických nástrojů.

## 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Při vyhodnocování výsledků získaných při experimentu byly použity z důvodu redukce velkého množství naměřených dat pouze aritmetické průměry z deseti naměřených hodnot smrštění na jednotlivých zkušebních tělesech. Tyto hodnoty jsou vyneseny v následujících tabulkách. Ke každé jednotlivé průměrné hodnotě smrštění je uvedena příslušná směrodatná odchylka  $\sigma$  souboru naměřených dat. Výsledky naměřené na zkušebních tělesech A a B se od sebe lišili nepatrně a proto jsou v následných tabulkách uváděny pouze výsledky výrobního smrštění naměřené na zkušebních tělesech označených písmenem A. Tyto výsledky jsou pak následně statisticky vyhodnoceny pomocí softwaru STATISTICA fy StatSoft, kdy pro posouzení interakce a vzájemných vlivů jednotlivých proměnných parametrů byla použita statistická metoda analýzy rozptylu. V programu STATISTICA byla provedena vícefaktorová analýza rozptylu a kromě jiných statistických veličin byla zjištěna velikost Fischerova kritéria u F-testů.

Při experimentálním měření byly u každé kombinace základních polypropylénových matric (homopolymer Mosten GB 005 a blokový kopolymer Mosten GB 506) spolu s přidávaným nanokoncentrátem měněny tři vstupní parametry ovlivňující výrobní smrštění.

Prvním parametrem bylo hmotnostní procento přidaného nanokoncentrátu Nanoblend a rozpětí hodnot bylo zvoleno na třech úrovních – 2, 4 a 6%. Mezi další měněné parametry patřily teplota taveniny  $T_t$  (200, 220 a 240°C) a teplota formy  $T_f$  (20, 40 a 60°C). Kombinace jednotlivých parametrů jsou ve vyhodnocení výsledků u jednotlivých vzorků vyjádřeny třemi číslicemi, označujícími parametry v tomto pořadí:

Procento Nanoblendu 1201 – Teplota taveniny  $T_t$  – Teplota formy  $T_f$ .

Pro popis vzorku z materiálu Mosten GB 005 + Nanoblend 1201 s 2% nanokoncentrátu vyrobený při teplotě taveniny 200°C a teplotě formy 40°C je tedy zvoleno označení trojčíslím 2 – 200 – 40.

Čtvrtým měněným parametrem byla tloušťka vzorků. Ta byla měněna na dvou úrovních (2 a 4 mm). Vyhodnocení výsledků měření pro jednotlivé tloušťky bylo provedeno odděleně.

Pro posouzení jednotlivých vlivů materiálových a technologických parametrů byly zhotoveny pro veškeré kombinace parametrů sloupcové 2D grafy, které jsou přiloženy v přílohách a na které bude při vyhodnocování odkazováno.

Vyhodnocení výsledků je rozděleno pro oba typy základní polypropylenové matrice (homopolymer Mosten GB 005 a blokový kopolymer Mosten GB 506) zvlášť.

#### 4.1 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

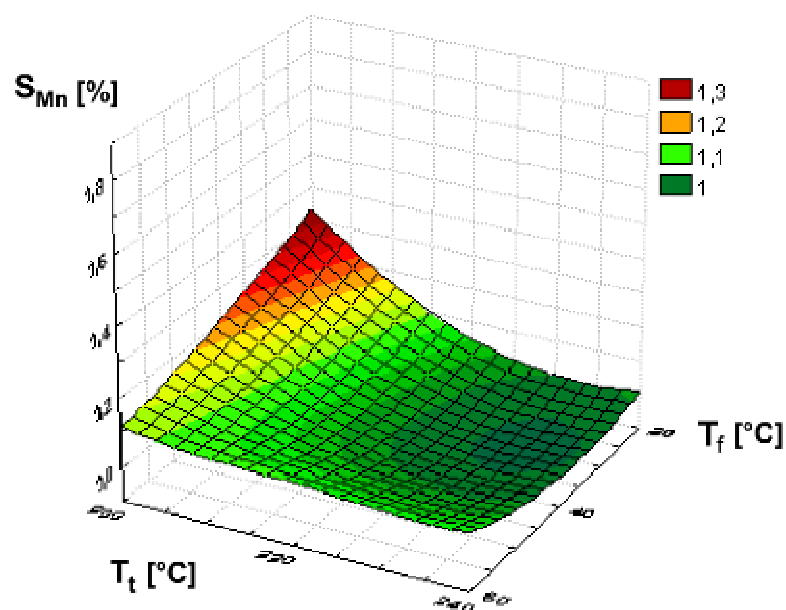
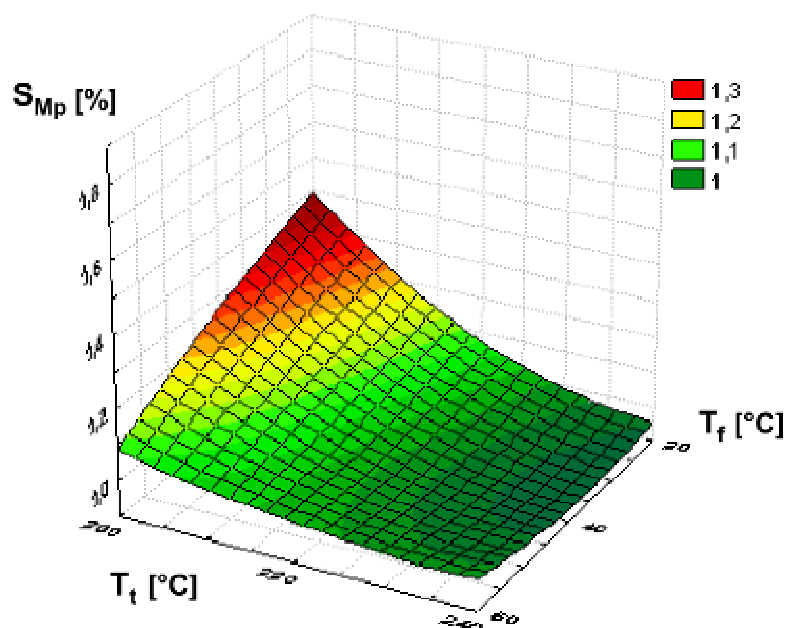
V následujících tabulkách 7 – 12 jsou zaznamenány naměřené hodnoty příčného i podélného smrštění pro zkušební tělesa vyrobená z polypropylénu Mosten GB 005 se třemi různými koncentracemi nanočástic (2, 4 a 6 % Nanoblendu 1201).

##### 4.1.1 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

Tab. 7: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,397	0,119	1,335	0,087
200 - 40	1,273	0,199	1,210	0,079
200 - 60	1,084	0,026	1,110	0,030
220 - 20	1,069	0,131	1,038	0,045
220 - 40	1,013	0,061	1,002	0,079
220 - 60	1,025	0,018	1,095	0,016
240 - 20	0,954	0,027	1,010	0,028
240 - 40	0,934	0,054	0,982	0,040
240 - 60	0,988	0,023	1,065	0,012

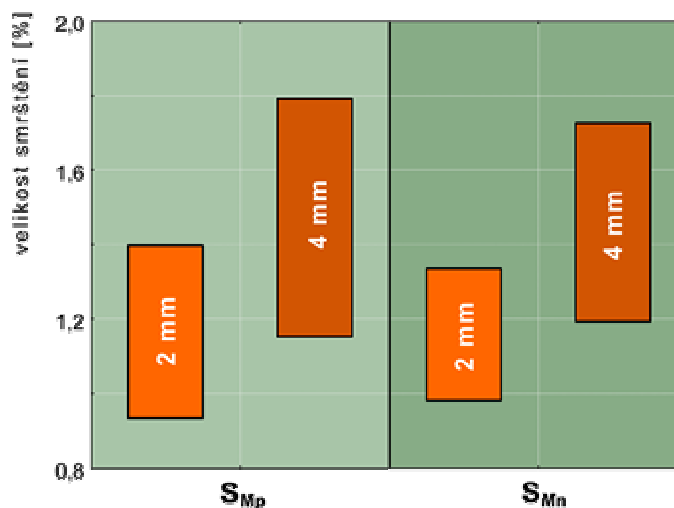




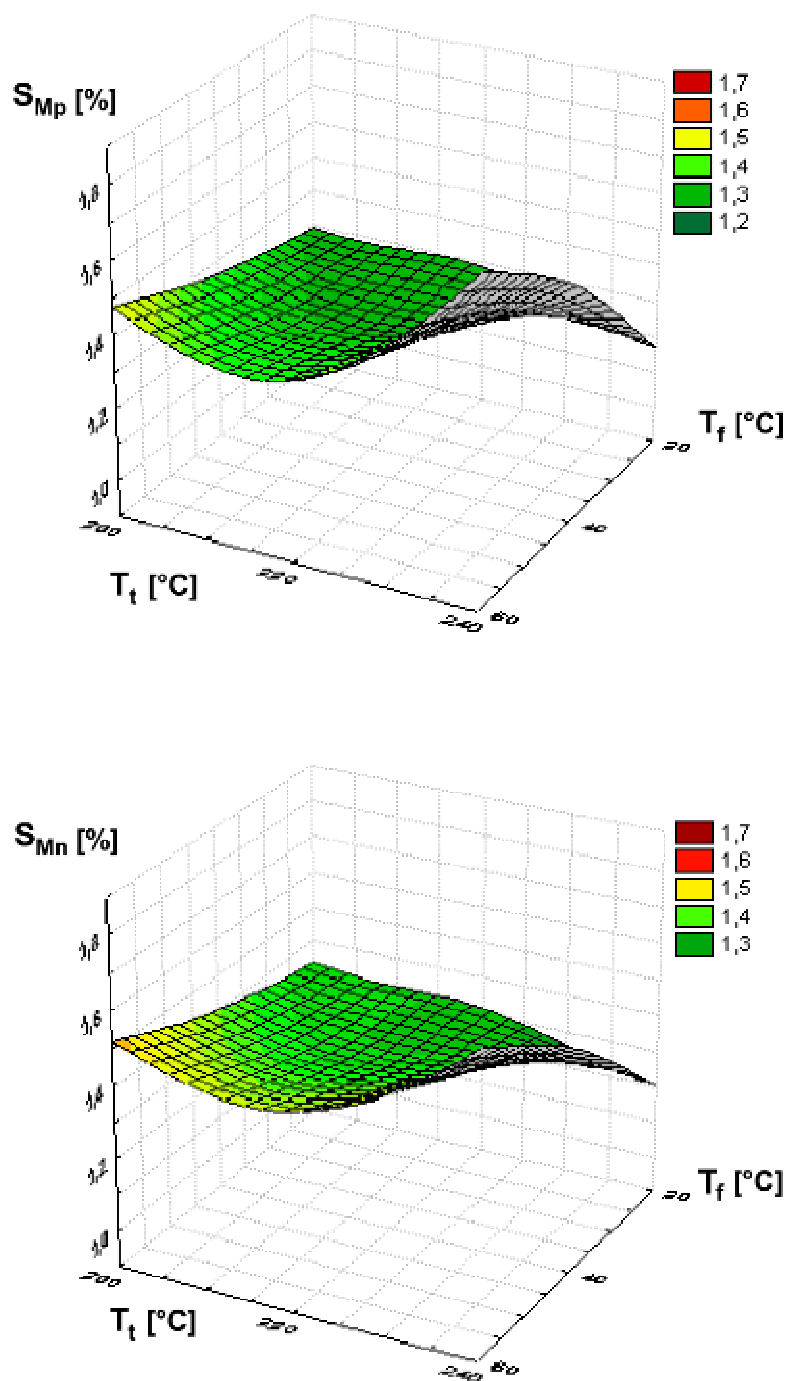
Obr. 61: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

Tab.8: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,281	0,055	1,330	0,037
200 - 40	1,363	0,064	1,402	0,052
200 - 60	1,488	0,029	1,528	0,030
220 - 20	1,329	0,065	1,347	0,049
220 - 40	1,288	0,023	1,332	0,016
220 - 60	1,371	0,057	1,428	0,049
240 - 20	1,153	0,027	1,193	0,018
240 - 40	1,573	0,089	1,532	0,048
240 - 60	1,791	0,062	1,725	0,058



Obr. 62: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru  
pro materiál Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

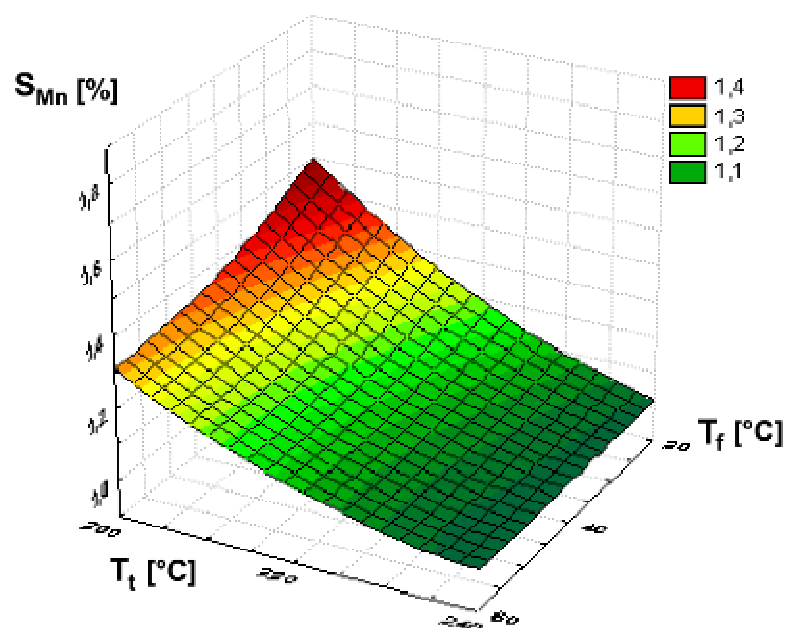
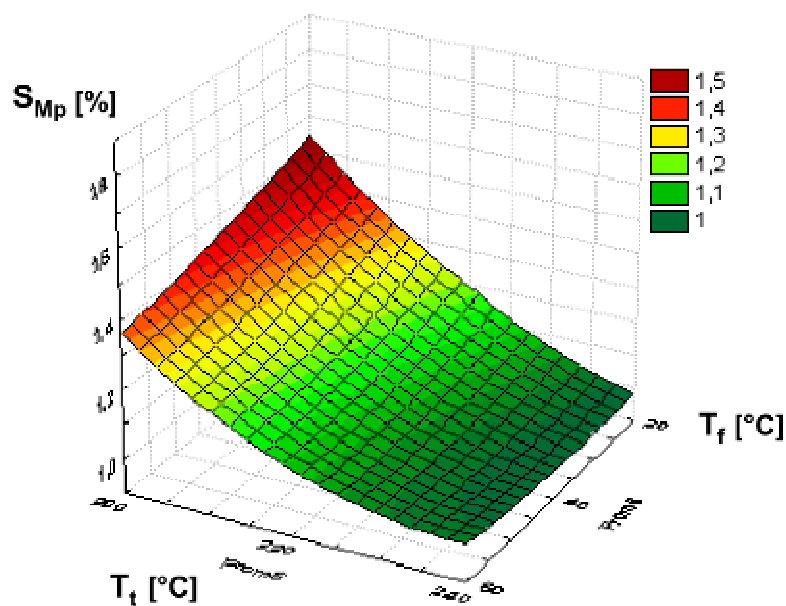


Obr. 63: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 2% Nanoblend 1201

#### 4.1.2 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201

Tab. 9: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201

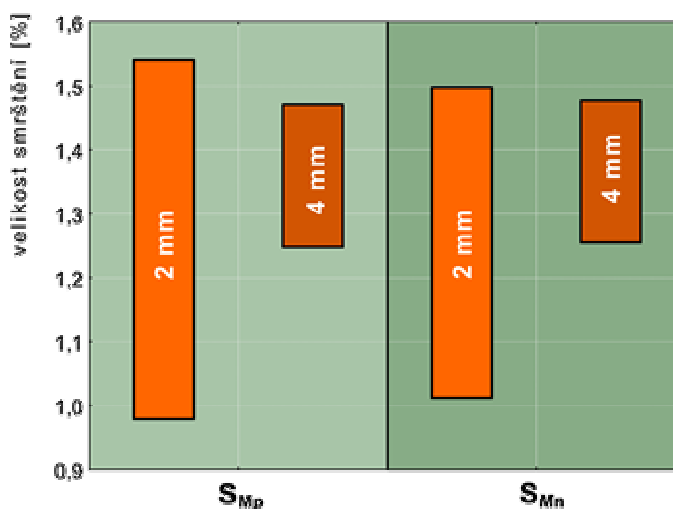
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,541	0,073	1,498	0,074
200 - 40	1,443	0,033	1,356	0,032
200 - 60	1,363	0,056	1,312	0,040
220 - 20	1,193	0,031	1,192	0,023
220 - 40	1,109	0,018	1,120	0,015
220 - 60	1,094	0,024	1,110	0,026
240 - 20	0,981	0,020	1,020	0,017
240 - 40	0,979	0,017	1,018	0,013
240 - 60	1,011	0,020	1,012	0,035



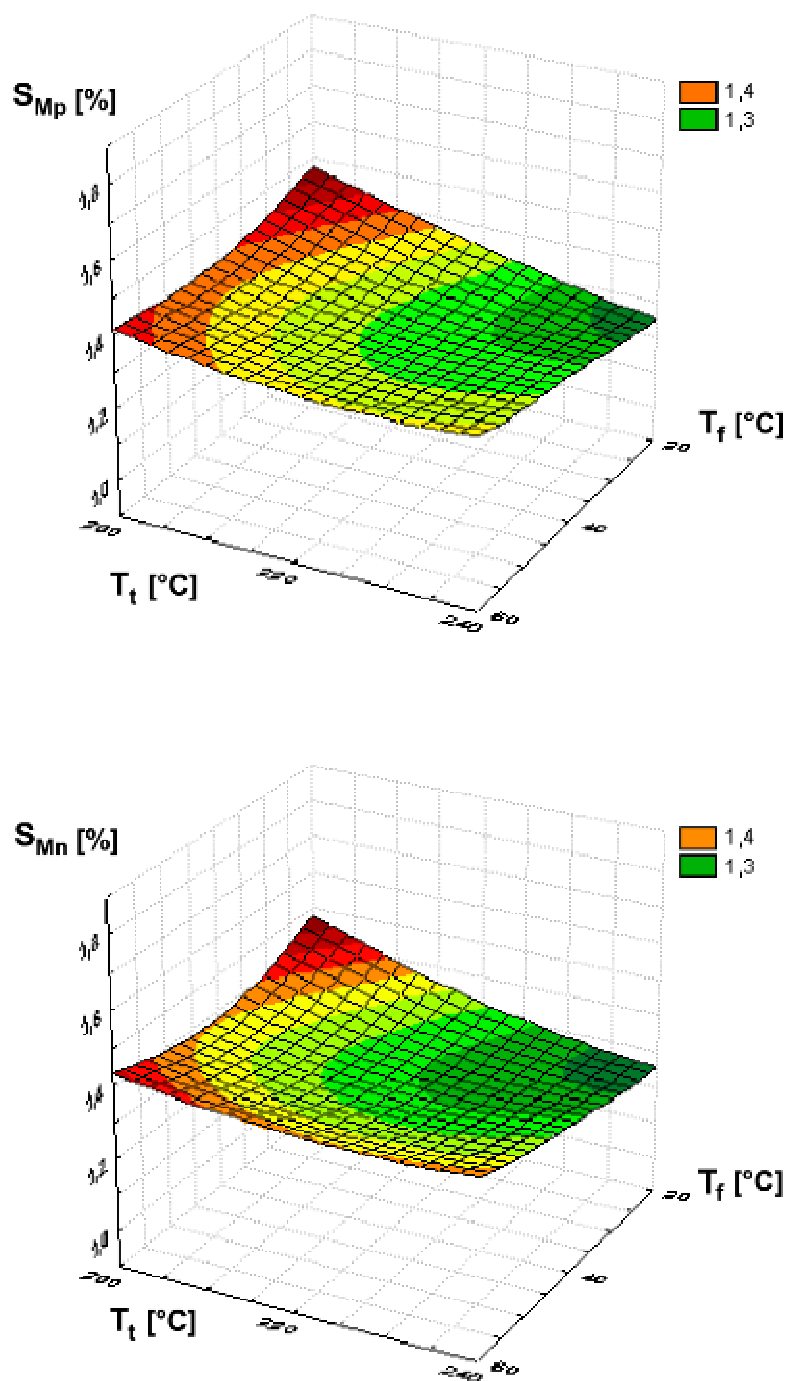
Obr. 64: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201

Tab. 10: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,471	0,091	1,477	0,113
200 - 40	1,391	0,010	1,372	0,018
200 - 60	1,423	0,027	1,438	0,025
220 - 20	1,349	0,038	1,330	0,037
220 - 40	1,316	0,049	1,305	0,037
220 - 60	1,358	0,020	1,385	0,015
240 - 20	1,248	0,060	1,255	0,031
240 - 40	1,316	0,027	1,318	0,022
240 - 60	1,364	0,017	1,392	0,018



Obr. 65: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201



Obr. 66: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 4% Nanoblend 1201

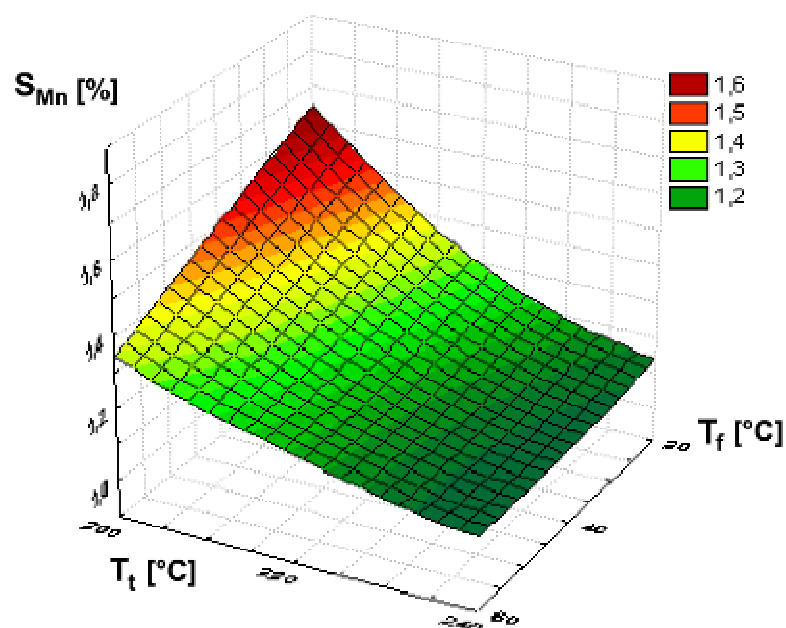
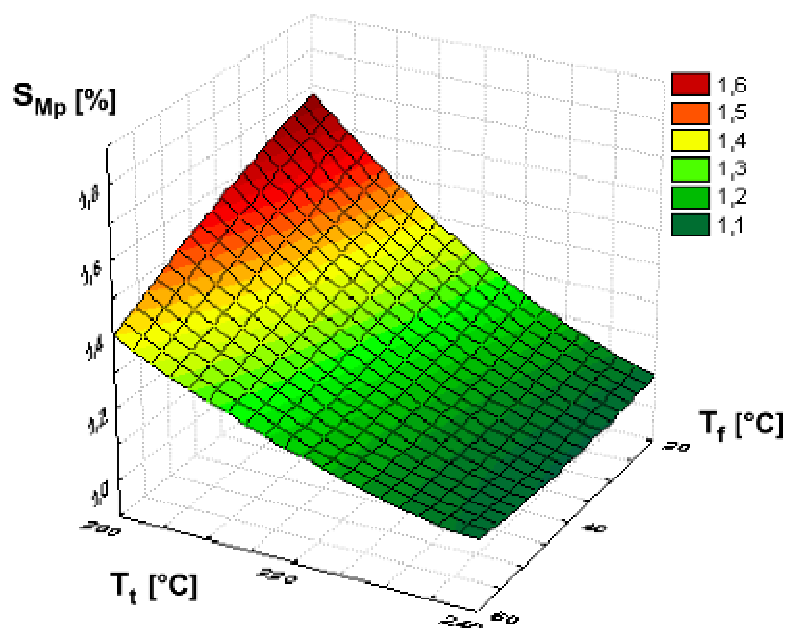


### 4.1.3 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201

Tab. 11: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	6 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,679	0,071	1,650	0,062
200 - 40	1,566	0,047	1,503	0,037
200 - 60	1,397	0,054	1,340	0,034
220 - 20	1,304	0,024	1,288	0,025
220 - 40	1,236	0,017	1,222	0,010
220 - 60	1,209	0,036	1,207	0,020
240 - 20	1,089	0,016	1,140	0,015
240 - 40	1,068	0,020	1,107	0,016
240 - 60	1,093	0,050	1,103	0,060

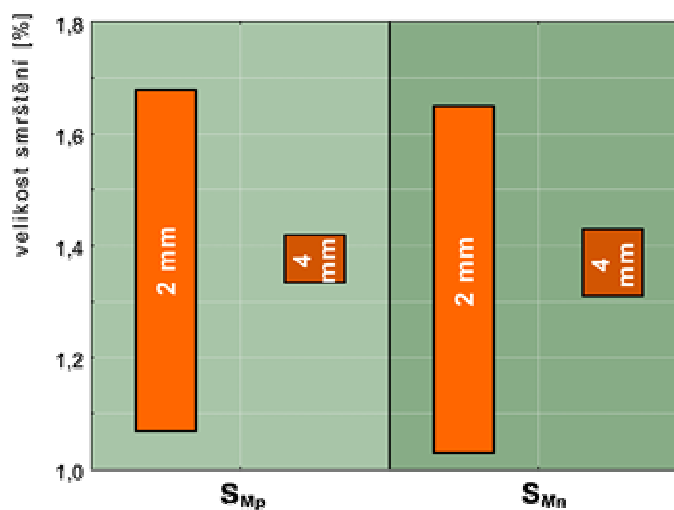




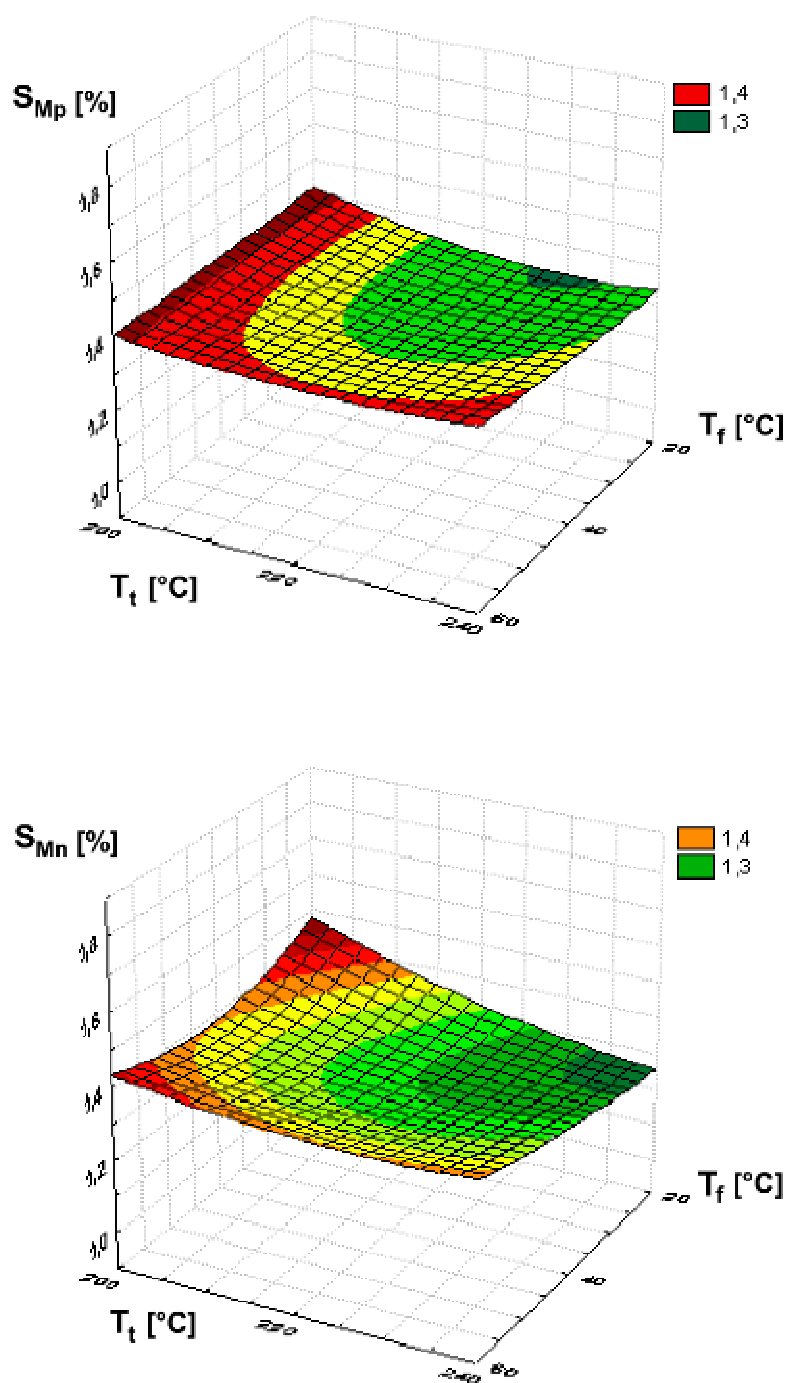
Obr. 67: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201

Tab. 12: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201			
koncentrace	6 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,419	0,024	1,422	0,030
200 - 40	1,411	0,025	1,412	0,031
200 - 60	1,406	0,032	1,418	0,023
220 - 20	1,333	0,025	1,310	0,020
220 - 40	1,338	0,022	1,325	0,019
220 - 60	1,384	0,022	1,402	0,019
240 - 20	1,334	0,012	1,332	0,013
240 - 40	1,361	0,023	1,367	0,016
240 - 60	1,399	0,026	1,430	0,020



Obr. 68: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201



Obr. 69: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 005 + 6% Nanoblend 1201

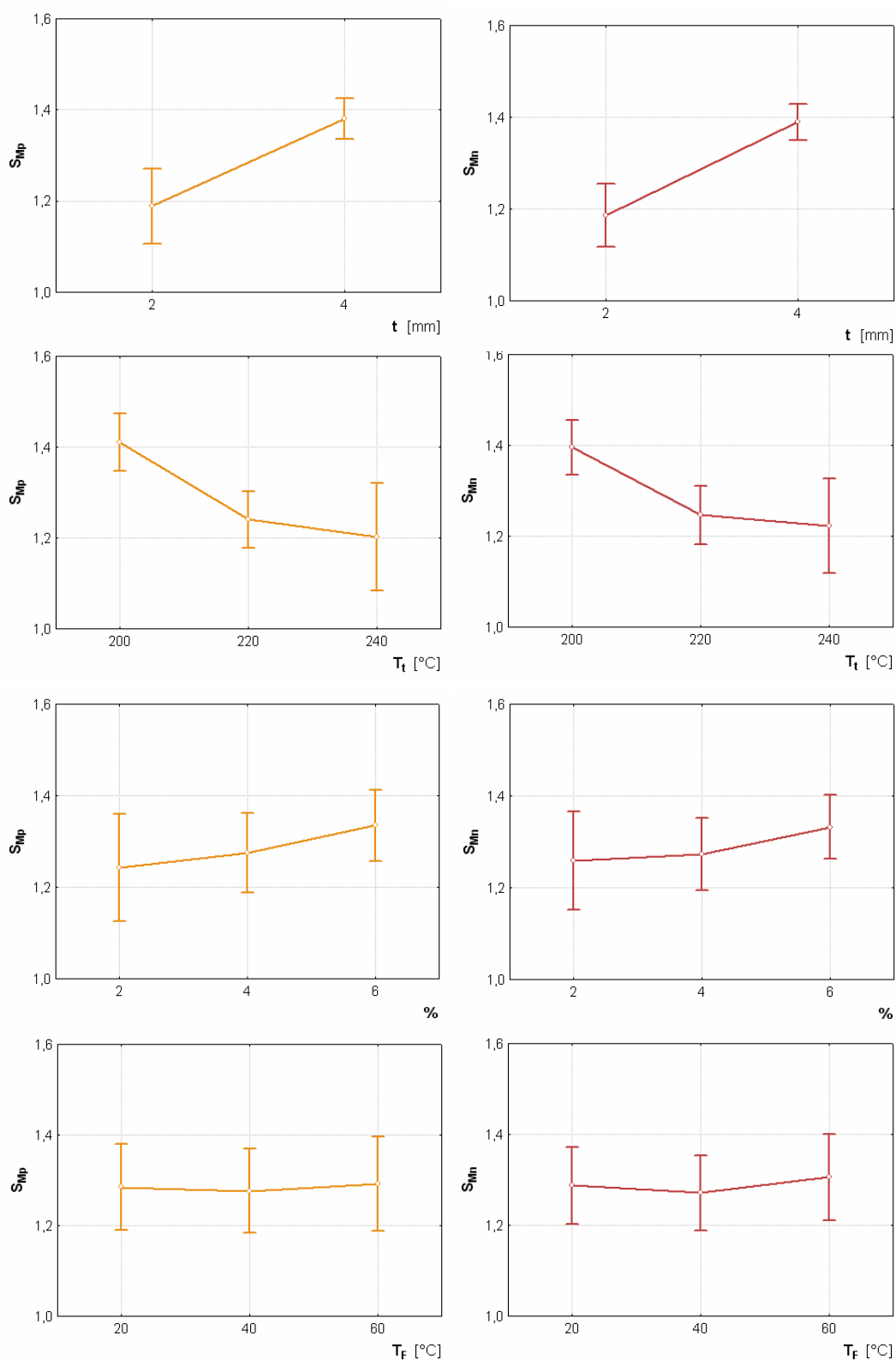
#### 4.1.4 Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Pro tloušťku vzorků 2 mm se objevuje u všech případů koncentrace Nanoblendu 1201 nejvyšší míra příčného i podélného smrštění u všech kombinací technologických parametrů 200-20 (obr. 61, 64 a 67). Nejnižší hodnota podélného smrštění a to 0,934%, byla naměřena pro vyrobené vzorky 2-240-40. Tyto vzorky měly také nejmenší příčné smrštění s hodnotou 0,982%. Naopak nejvyšší hodnotu smrštění jak podélného, tak i příčného dosahujeme u nastavení technologických parametrů  $T_f=200$  a  $T_f=20$  při 6-ti procentní koncentraci Nanoblendu 1201. Se zvyšováním procent nanokompozitu vzrůstá výrobní smrštění (graf 1 - 9). Se zvyšující se teplotou formy nám výrobní smrštění klesá, což je patrné z grafů 10 - 18. Stejný vliv na velikost výrobního smrštění jako má teplota formy, má také změna teploty taveniny (grafy 19 - 27). Rozdíly mezi velikostmi výrobního smrštění v podélném a příčném směru jsou v rozmezí 0,001 – 0,087%.

Pro tloušťku vzorků 4 mm se průběh výrobního smrštění liší v závislosti na koncentraci Nanoblendu 1201. Zatímco u koncentrace 4% a 6% je průběh obdobný jako u vzorků tloušťky 2 mm, u dvouprocentní koncentrace Nanoblendu 1201 se vyskytuje nejvyšší smrštění při teplotě taveniny 240°C a teplotě formy 60°C. Průběh výrobního smrštění (obr. 66 a 69) je téměř shodný jak v příčném směru, tak i v podélném směru. Při dvouprocentní koncentraci a teplotě taveniny 240°C a teplotě formy 20°C bylo naměřeno nejmenší výrobní smrštění a to jak v podélném, tak v příčném směru ( $S_{Mp}=1,153\%$ ;  $S_{Mn}=1,193\%$ ). Nejvyšší hodnoty výrobního smrštění ( $S_{Mp}=1,791\%$ ;  $S_{Mn}=1,725\%$ ) byly naměřeny při následných podmínkách vstřikování: teplota taveniny 240°C, teplota formy 60°C a obsah Nanoblendu 1201 2%. Z grafů 64 - 72, ve kterých jsou vyneseny závislosti  $S_{Mp}$  a  $S_{Mn}$  na teplotě formy, vyplývá, že s rostoucí teplotou formy roste také výrobní smrštění. Posuzujeme-li vliv teploty taveniny na výrobní smrštění nezávisle na ostatních proměnných parametrech (graf 73-81), jeví se z hlediska minimálních hodnot výrobního smrštění optimální volit pro tloušťky vzorků 4 mm teplotu taveniny 220°C.

#### 4.1.5 Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Při statistickém vyhodnocení naměřených experimentálních výsledků byl použit systém analytického softwaru STATISTICA 6.1 firmy StatSoft. Po přípravě naměřených dat do potřebného formátu nutného pro importování do programu Statistica byla provedena vícerozměrná analýza ANOVA. Výsledky analýzy nabídl software v několika různých modifikacích – a to jak formou grafů, či formou přehledných tabulek s hodnotami Fischerova kritéria (F). K velkému rozsahu počtu výstupů byly v této práci pro statistické posouzení naměřených dat zvoleny pouze některé z výstupních grafů a tabulek a to jak pro posouzení vlivu hlavních efektů, tak i pro jejich vzájemnou interakci. Pro hodnocení vlivu jednotlivých faktorů vycházíme z velikosti Fischerova kritéria (F). Čím je hodnota F vyšší, tím významnější je vliv příslušného faktoru či jejich interakce. Sloupec p-Value udává statistickou významnost faktoru, tj. zda chování výstupního parametru v závislosti na vstupu je pouze náhodné anebo zda vstupní parametr má statisticky významný vliv na výstup. Všechny testy ANOVA v rámci tohoto experimentu byly provedeny na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Dosahuje-li tedy p-Value větší hodnotu než 0,05 je vliv vstupního parametru nevýznamný a lze tvrdit, že s pravděpodobností  $1 - \alpha$  nemá tento faktor vliv na hodnotu závislé výstupní proměnné. A naopak, pokud je hodnota p-Value nižší než 0,05, má vstupní parametr statisticky významný účinek s 95%-ní pravděpodobností.



Obr. 70: Vlivy proměnných parametrů (faktorů) na výrobní smrštění v příčném a podélném směru pro materiál PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Tab. 13: Výsledky analýzy rozptylu pro Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Hlavní efekty	Wilksova hodnota	F	p - Value
t	0,009	366,3	0,000*
%	0,042	13,6	0,000*
T <sub>t</sub>	0,022	19,9	0,000*
T <sub>f</sub>	0,059	10,9	0,000*
Interakce efektů	Wilksova hodnota	F	p - Value
t * %	0,065	10,2	0,000*
t * T <sub>t</sub>	0,040	13,9	0,000*
% * T <sub>t</sub>	0,088	4,2	0,010*
t * T <sub>f</sub>	0,076	9,2	0,001*
% * T <sub>f</sub>	0,063	5,2	0,004*
T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,015	12,6	0,000*
t * % * T <sub>t</sub>	0,052	5,9	0,002*
t * % * T <sub>f</sub>	0,034	7,8	0,001*
t * T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,206	2,1	0,107*
% * T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,093	2,0	0,102*

## 4.2 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

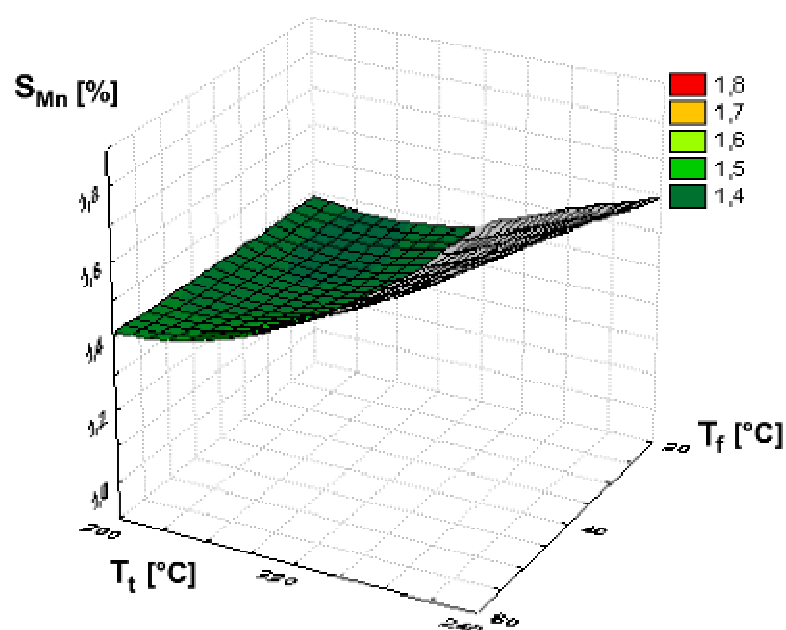
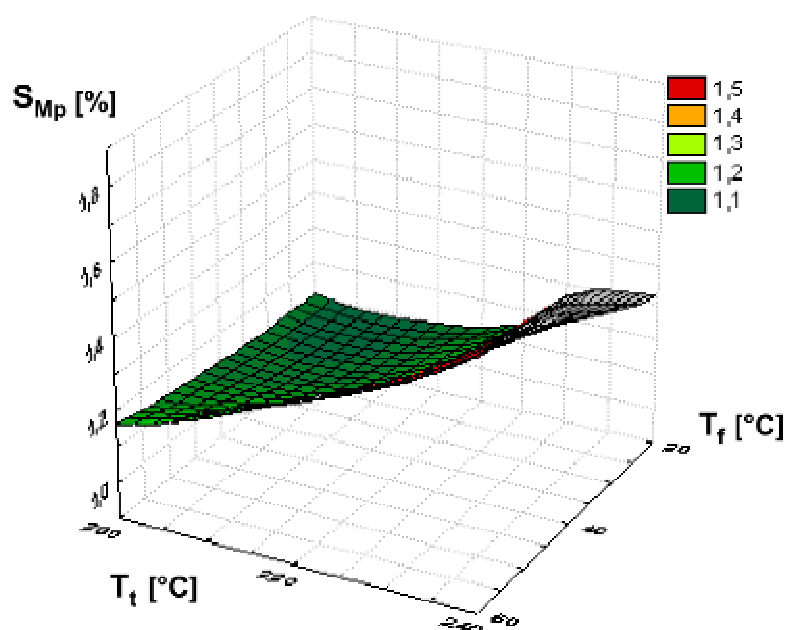
Hodnoty výrobního smrštění pro materiál Mosten GB 506 s různou koncentrací nanočástic jsou zaznamenány v následujících tabulkách 14 – 19.

### 4.2.1 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Tab. 14: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,108	0,130	1,389	0,069
200 - 40	1,122	0,039	1,406	0,040
200 - 60	1,159	0,042	1,414	0,059
220 - 20	1,130	0,093	1,417	0,102
220 - 40	1,148	0,050	1,411	0,059
220 - 60	1,368	0,111	1,551	0,106
240 - 20	1,313	0,100	1,589	0,028
240 - 40	1,556	0,071	1,769	0,082
240 - 60	1,570	0,082	1,798	0,120

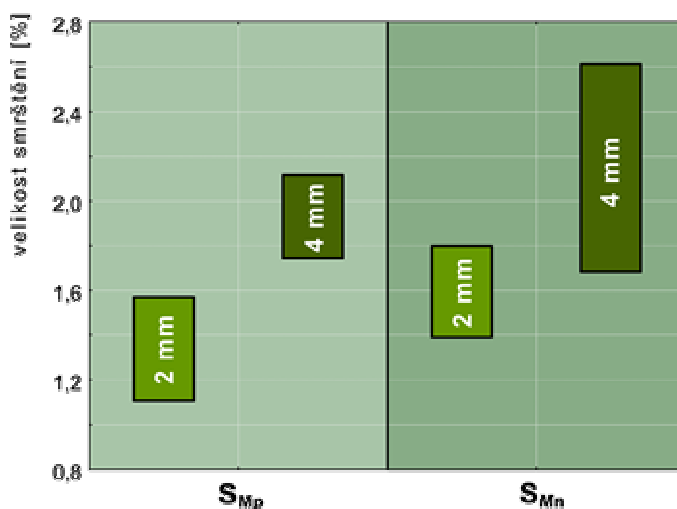




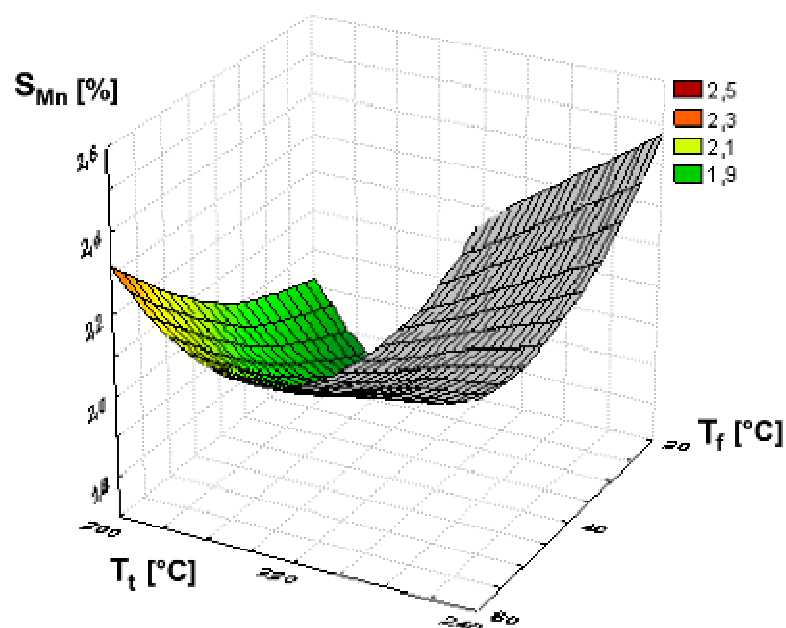
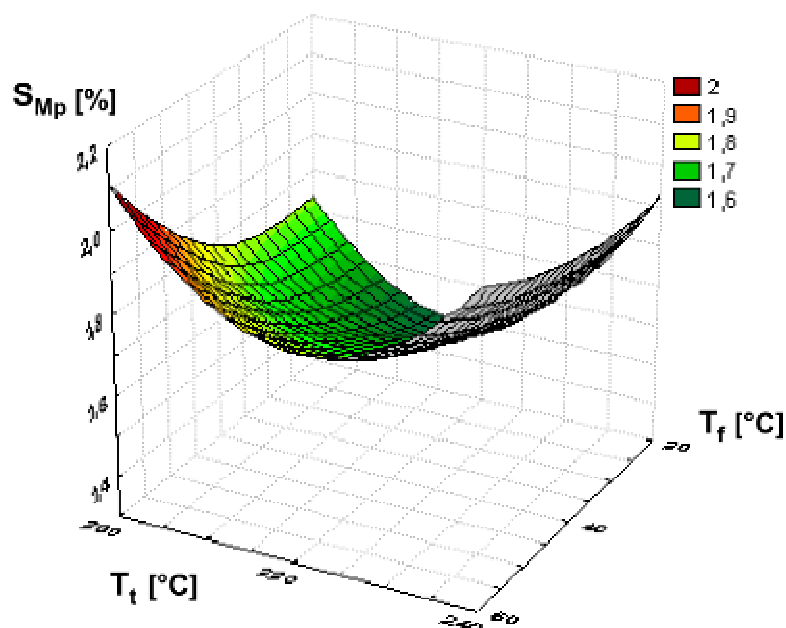
Obr. 71: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Tab. 15: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,745	0,363	1,931	0,374
200 - 40	1,768	0,156	2,029	0,198
200 - 60	2,116	0,341	2,317	0,306
220 - 20	1,485	0,068	1,683	0,113
220 - 40	1,648	0,053	1,934	0,083
220 - 60	1,808	0,056	2,143	0,069
240 - 20	1,928	0,032	2,480	0,020
240 - 40	1,945	0,015	2,546	0,032
240 - 60	2,065	0,015	2,614	0,019



Obr. 72: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

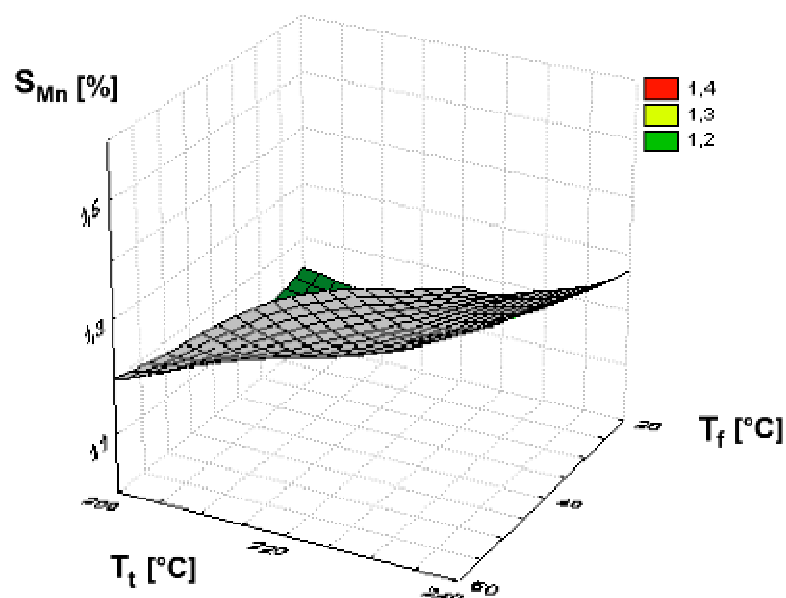
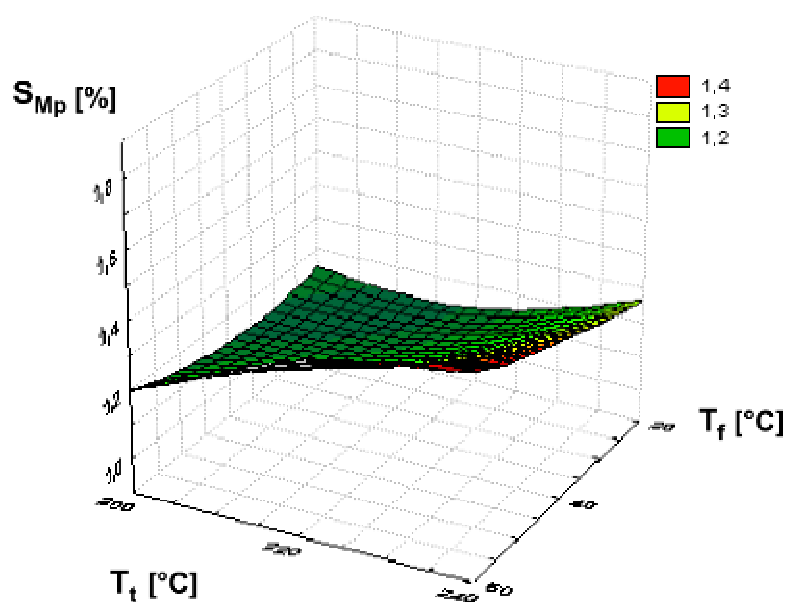


Obr. 73: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

## 4.2.2 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

Tab. 16: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

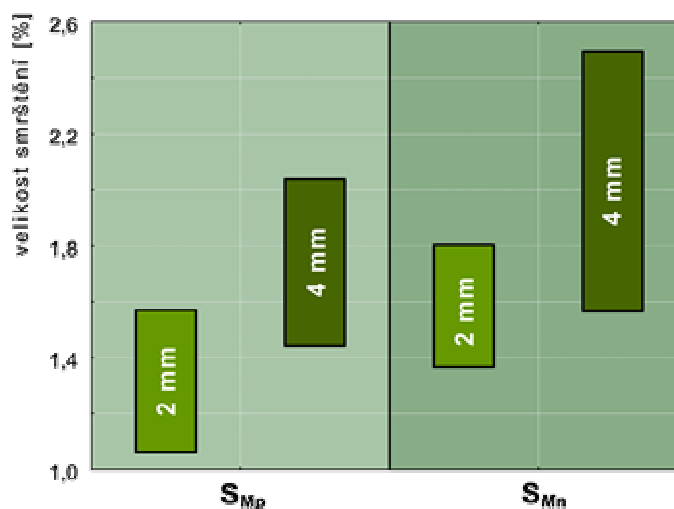
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,236	0,035	1,457	0,083
200 - 40	1,156	0,037	1,440	0,082
200 - 60	1,202	0,074	1,469	0,076
220 - 20	1,062	0,095	1,366	0,053
220 - 40	1,168	0,023	1,449	0,040
220 - 60	1,570	0,066	1,789	0,069
240 - 20	1,319	0,063	1,640	0,038
240 - 40	1,336	0,024	1,583	0,042
240 - 60	1,451	0,036	1,803	0,073



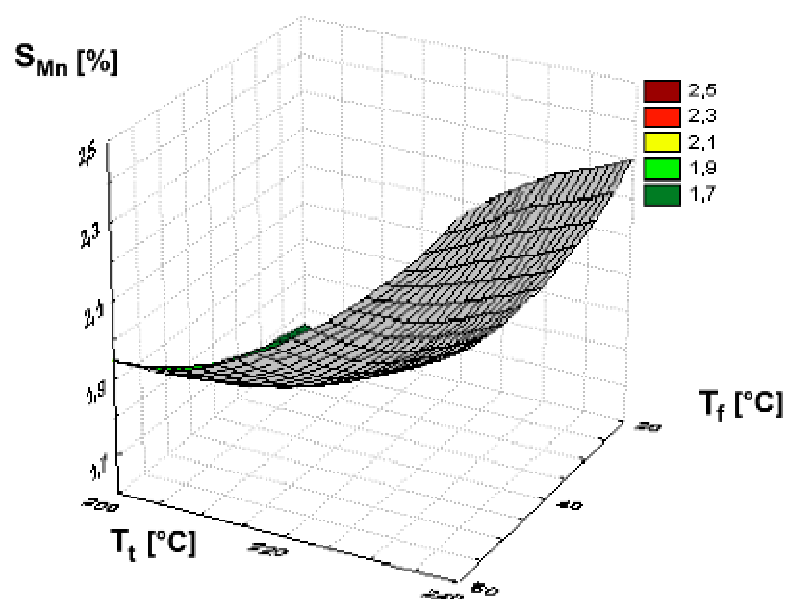
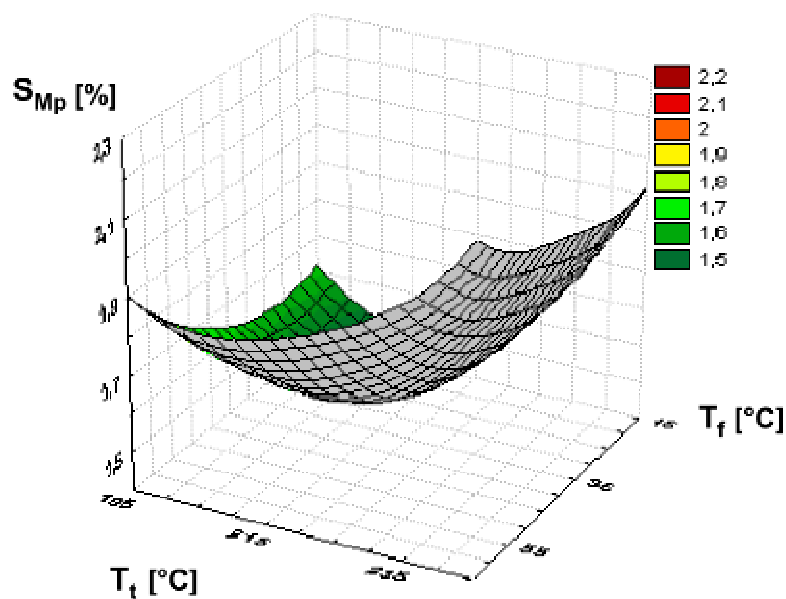
Obr. 74: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

Tab. 17: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,442	0,021	1,566	0,015
200 - 40	1,517	0,024	1,657	0,042
200 - 60	1,625	0,057	1,783	0,047
220 - 20	1,605	0,051	1,846	0,076
220 - 40	1,580	0,074	1,934	0,092
220 - 60	1,973	0,044	2,291	0,038
240 - 20	1,699	0,048	2,031	0,150
240 - 40	1,911	0,023	2,437	0,027
240 - 60	2,039	0,020	2,494	0,030



Obr. 75: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201



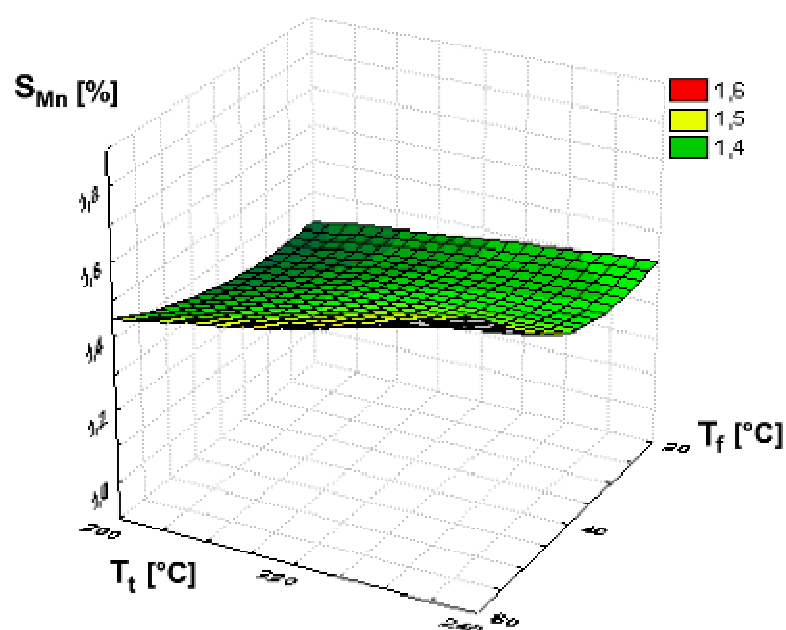
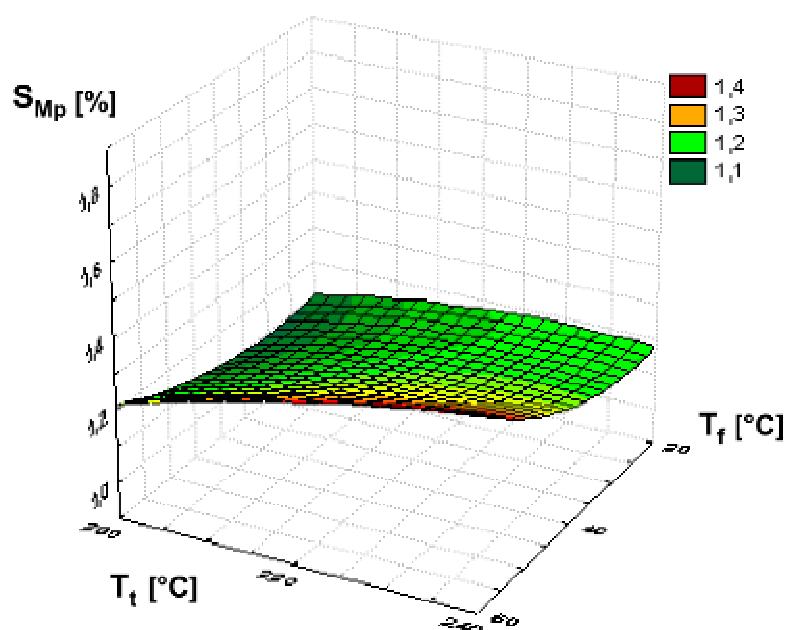
Obr. 76: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

### 4.2.3 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201

Tab. 18: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	6 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,102	0,034	1,317	0,021
200 - 40	1,108	0,025	1,334	0,028
200 - 60	1,219	0,033	1,451	0,068
220 - 20	1,174	0,061	1,371	0,040
220 - 40	1,202	0,079	1,423	0,059
220 - 60	1,342	0,088	1,529	0,076
240 - 20	1,176	0,034	1,420	0,049
240 - 40	1,219	0,057	1,420	0,088
240 - 60	1,425	0,036	1,683	0,045

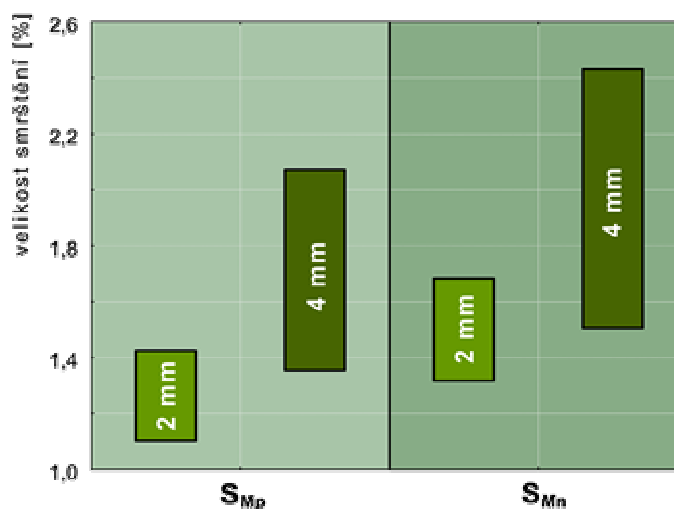




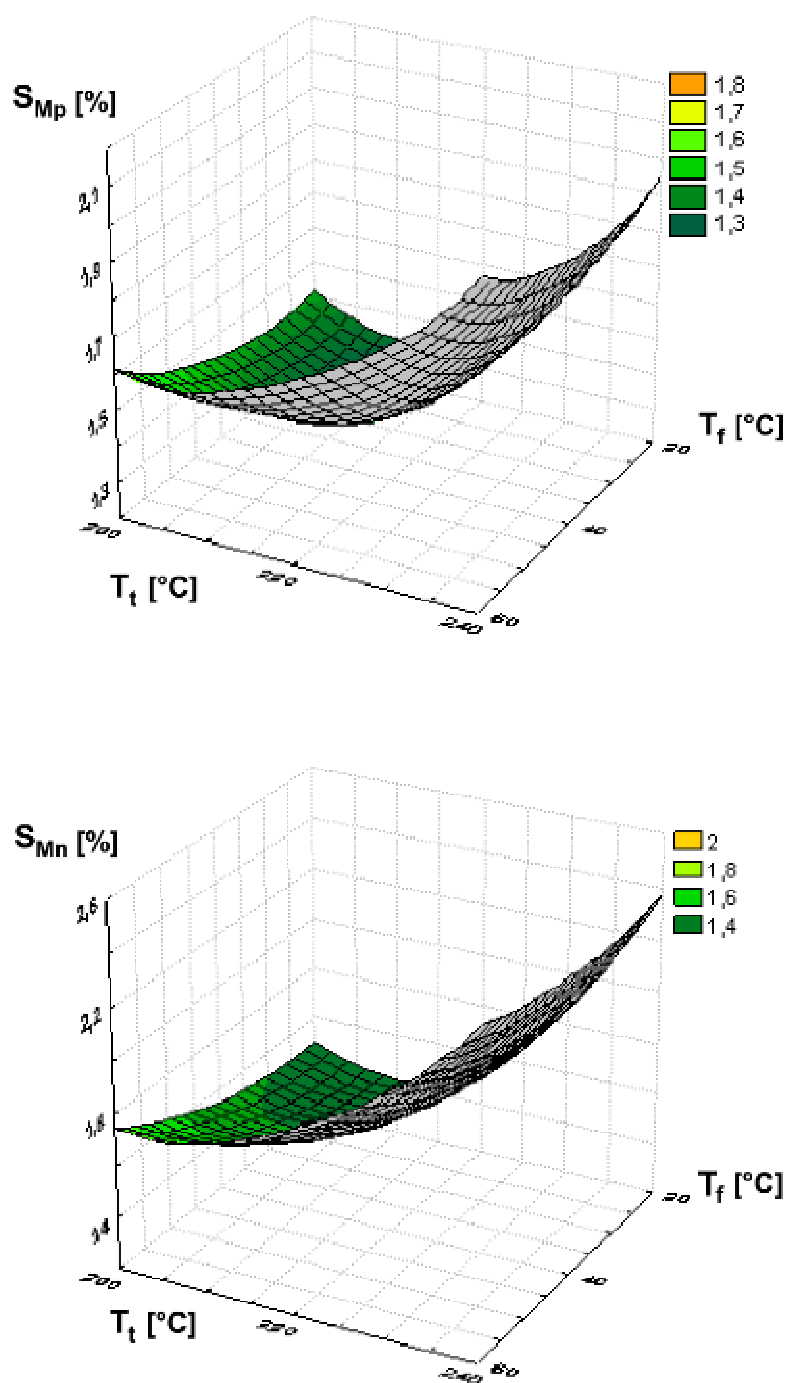
Obr. 77: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201

Tab. 19: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	6 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,417	0,027	1,506	0,043
200 - 40	1,451	0,030	1,549	0,030
200 - 60	1,602	0,034	1,740	0,068
220 - 20	1,382	0,079	1,506	0,065
220 - 40	1,354	0,025	1,626	0,065
220 - 60	1,731	0,075	1,934	0,043
240 - 20	1,948	0,034	2,380	0,037
240 - 40	1,942	0,014	2,351	0,028
240 - 60	2,071	0,028	2,431	0,032



Obr. 78: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201



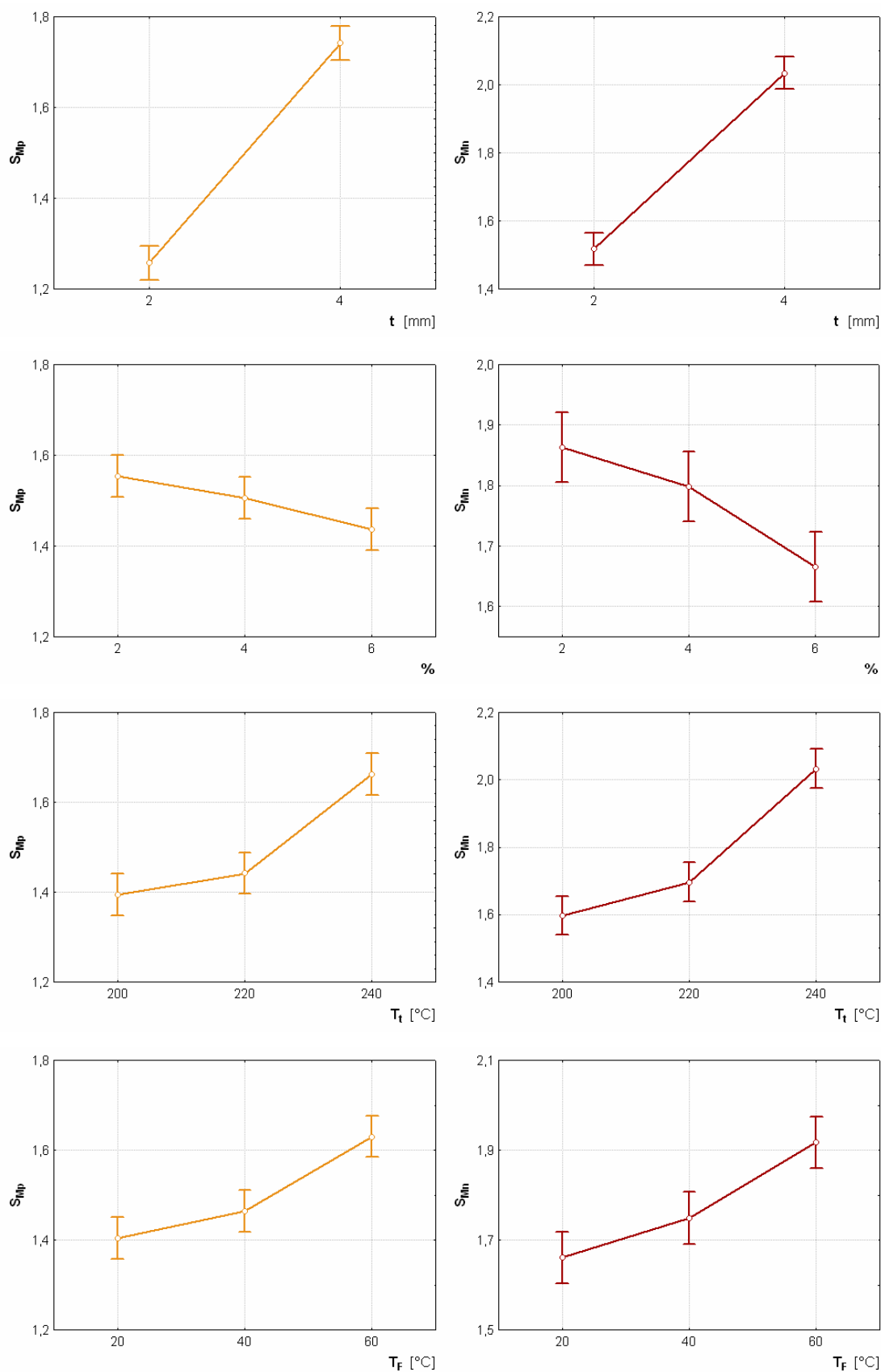
Obr. 79: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z PP Mosten GB 506 + 6% Nanoblend 1201

#### **4.2.4 Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál Mosten GB 506 + Nanoblend 1201**

Zjištěné hodnoty výrobního smrštění těles vyrobených z materiálu Mosten GB 506 + Nanoblend 1201 se pohybovaly v rozmezí od 1,062 do 1,570% v podélném směru a od 1,317 do 1,803% v příčném směru pro dvoumilimetrovou tloušťku. Z 3D grafů na obr. 71, 74 a 77 je patrné, že maximálních hodnot smrštění v obou měřených směrech je dosaženo při teplotě taveniny 240 °C. Výrobní smrštění příčné je u všech vzorků vyšší než výrobní smrštění podélné a pokud budeme porovnávat rozmezí rozdílů, zjistíme u každého vzorku přibližně stejný rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami smrštění (graf 28 - 36). Z průběhu grafů v příloze 37 - 45 je znatelný vliv teploty formy na velikost smrštění. Se stoupající hodnotou teploty formy opět roste i výrobní smrštění. Vliv obsahu nanokoncentrátu na smrštění není jednoznačný ve všech měřených případech. Co se týká vlivu teploty taveniny, s její vzrůstající hodnotou roste hodnota výrobního smrštění.

U vzorků o tloušťce 4 mm se můžeme setkat s hodnotami podélného výrobního smrštění v rozmezí od 1,354 do 2,116%, v příčném směru jsou hodnoty o něco vyšší v rozsahu od 1,506 do 2,614%. Z grafů na obr. 73, 76 a 79 je zřejmé, že nejnižší hodnoty výrobního smrštění můžeme nalézt u vzorků vyrobených při teplotě taveniny 220 °C. Naopak nejvyšších hodnot výrobního smrštění dosahují vzorky vyrobené při teplotě taveniny 240 °C. Obdobně jako u dvoumilimetrových těles i zde platí, že se vzrůstající teplotou formy výrobní smrštění roste (grafy 91 - 99). Vzrůstající tendence hodnot výrobního smrštění v závislosti na teplotě taveniny (grafy 100 - 105) jsou patrné pouze u čtyřprocentní koncentrace materiálu. U zbylých koncentrací nenarůstá smrštění úměrně se stoupající teplotou taveniny, ale je nejnižší u prostřední hodnoty z rozmezí nastavovaných teplot taveniny použitých při experimentálním měření.

#### **4.2.5 Výsledky analýzy rozptylu pro materiál GB 506 + Nanoblend 1201**



Obr. 80: Vlivy proměnných parametrů (faktorů) na výrobní smrštění v příčném a podélném směru pro materiál PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

Tab. 20: Výsledky analýzy rozptylu pro Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

Hlavní efekty	Wilksova hodnota	F	p - Value
t	0,018	194,5	0,000*
%	0,159	5,3	0,008*
T <sub>t</sub>	0,036	14,9	0,000*
T <sub>f</sub>	0,083	8,6	0,001*
Interakce efektů	Wilksova hodnota	F	p - Value
t * %	0,372	2,2	0,117
t * T <sub>t</sub>	0,051	12,0	0,000*
% * T <sub>t</sub>	0,233	1,9	0,145
t * T <sub>f</sub>	0,432	1,8	0,180
% * T <sub>f</sub>	0,667	0,4	0,906
T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,409	1,0	0,485
t * % * T <sub>t</sub>	0,143	2,9	0,041*
t * % * T <sub>f</sub>	0,693	0,4	0,929
t * T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,346	1,2	0,353
% * T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,369	0,6	0,863

### 4.3 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 005

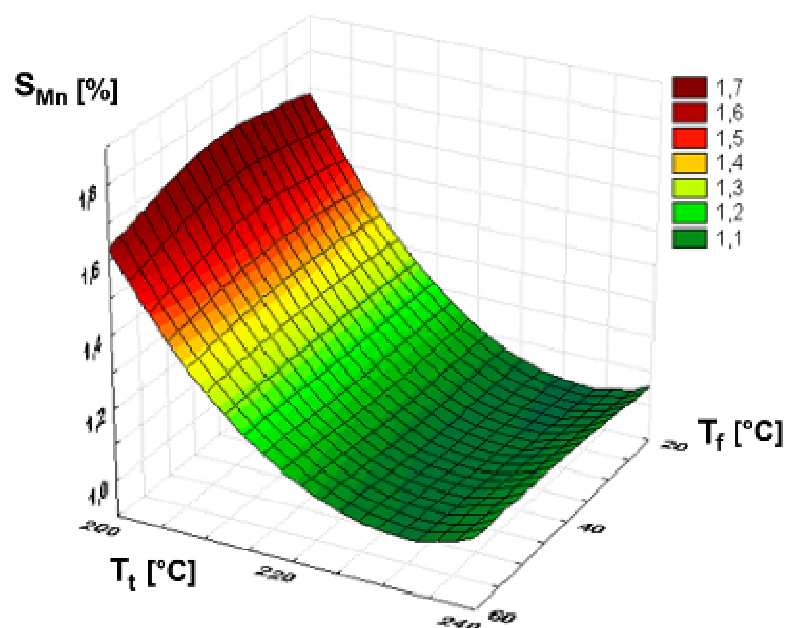
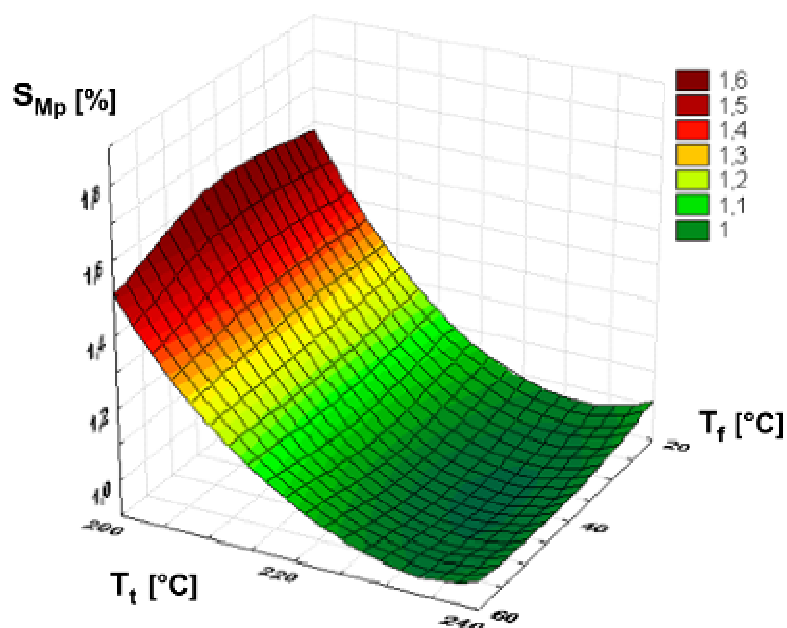
V experimentálním měření bylo provedeno také měření výrobního smrštění obou představitelů termoplastické matrice bez přidaných nanočástic. Tabulky 21 a 22 udávají naměřené střední hodnoty smrštění pro podélný a příčný směr pro materiál Mosten GB 005.



### 4.3.1 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005

Tab. 21: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,571	0,088	1,676	0,086
200 - 40	1,643	0,241	1,744	0,149
200 - 60	1,499	0,244	1,628	0,249
220 - 20	1,051	0,030	1,120	0,047
220 - 40	0,983	0,046	1,092	0,018
220 - 60	1,071	0,059	1,140	0,058
240 - 20	1,015	0,033	1,056	0,077
240 - 40	0,963	0,026	1,092	0,030
240 - 60	0,975	0,083	1,096	0,071

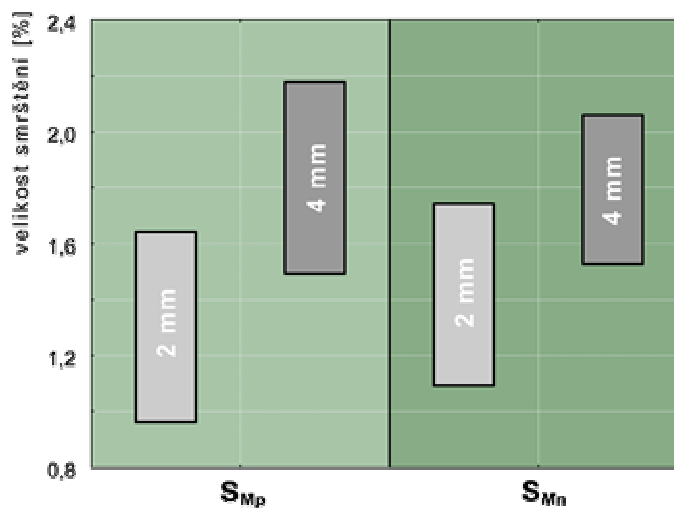


Obr. 81: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z materiálu PP Mosten GB 005

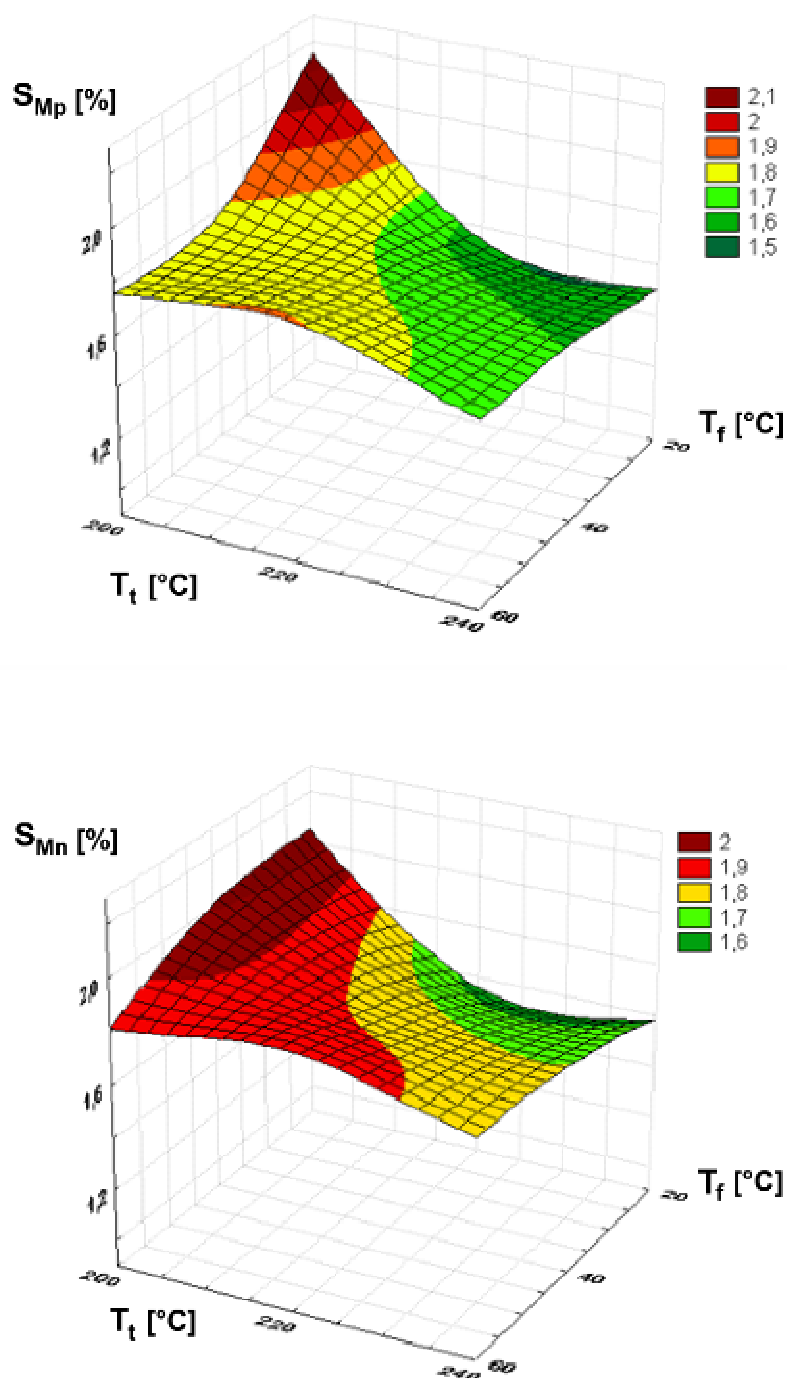


Tab. 22: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 005

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 005			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	2,179	0,481	2,059	0,311
200 - 40	1,739	0,121	2,019	0,133
200 - 60	1,756	0,167	1,802	0,184
220 - 20	1,493	0,012	1,526	0,012
220 - 40	1,713	0,160	1,753	0,192
220 - 60	1,839	0,071	1,929	0,096
240 - 20	1,514	0,084	1,594	0,075
240 - 40	1,604	0,144	1,699	0,200
240 - 60	1,594	0,019	1,719	0,016



Obr. 82: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru  
pro materiál Mosten GB 005



Obr. 83: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 4mm vzorky z materiálu PP Mosten GB 005

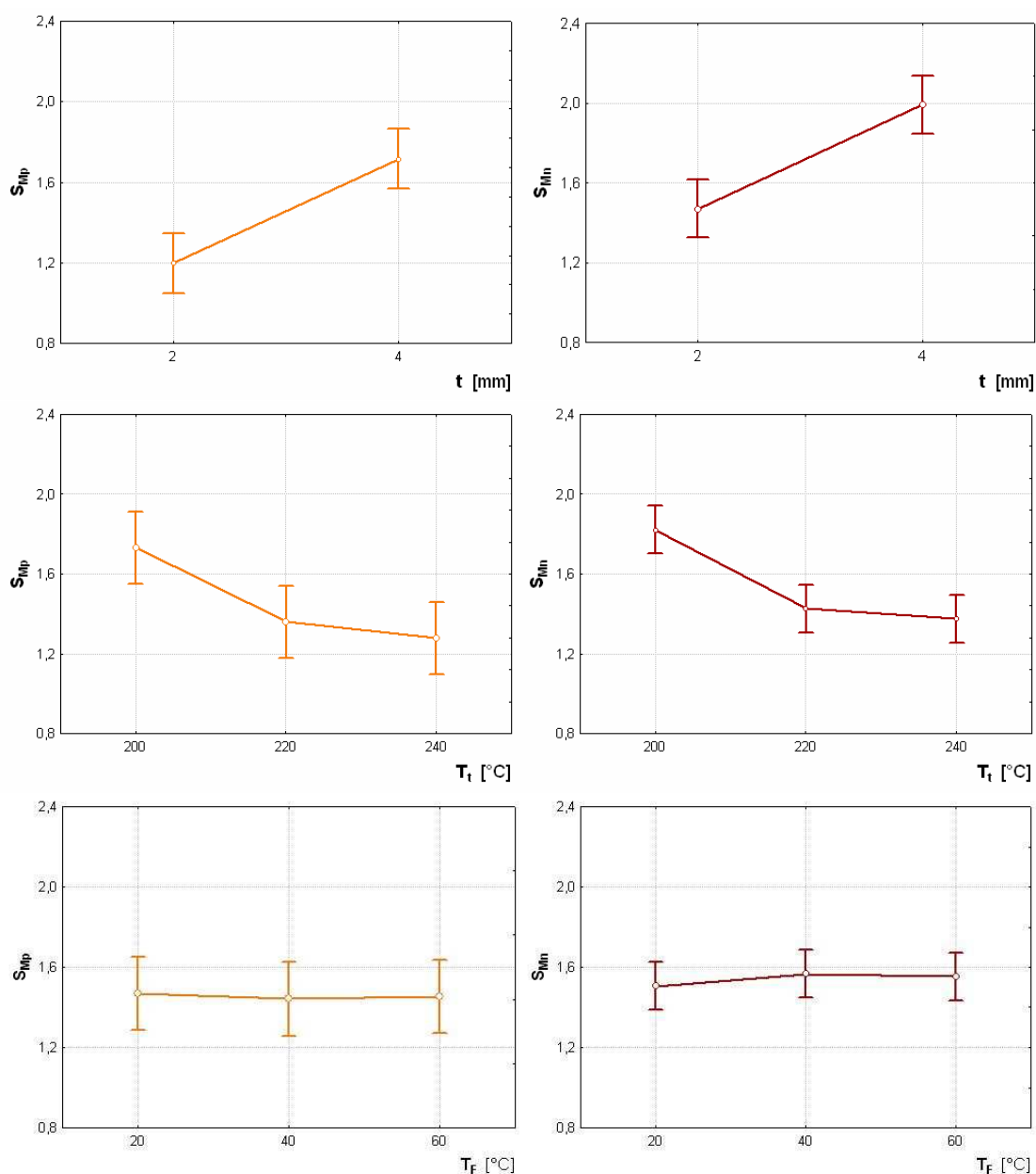
### 4.3.2 Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál Mosten GB 005

Maximální výrobní smrštění bylo u všech vzorků bez ohledu na velikost tloušťky vzorku dosaženo při nastavení teploty taveniny 200°C. Se vzrůstající teplotou taveniny pak velikost výrobního smrštění v příčném i v podélném směru klesala. Přesné hodnoty smrštění jsou dle grafů 109 - 120 následující: nejvyšší hodnota pro dvoumilimetrové vzorky je 1,643% pro podélné a 1,774% pro příčné smrštění, minima jsou 1,056% pro příčné a 0,963% pro podélné smrštění. U čtyřmilimetrových vzorků hodnoty vycházejí o něco vyšší, konkrétně pak 2,179% jako maximální hodnota podélného smrštění a 2,059% příčného smrštění, minimální hodnota podélného smrštění je 1,493% a 1,526% pro příčné minimum. Nejvyšší rozdíl podélného a příčného smrštění (0,28%) měly vzorky vyrobené při nastavení teploty taveniny na 200°C a teplotě formy 40°C pro 4mm vzorky.

### 4.3.3 Výsledky analýzy rozptylu pro materiál GB 005

Tab. 23: Výsledky analýzy rozptylu pro Mosten GB 005

Hlavní efekty	Wilksova hodnota	F	p - Value
t	0,037	38,81	0,007*
T <sub>t</sub>	0,051	5,14	0,038*
T <sub>f</sub>	0,441	0,76	0,588
Interakce efektů	Wilksova hodnota	F	p - Value
t * T <sub>t</sub>	0,263	1,43	0,332
t * T <sub>f</sub>	0,691	0,30	0,865
T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,240	0,78	0,638



Obr. 84: Vlivy proměnných parametrů (faktorů) na výrobní smrštění v příčném a podélném směru pro materiál PP Mosten GB 005

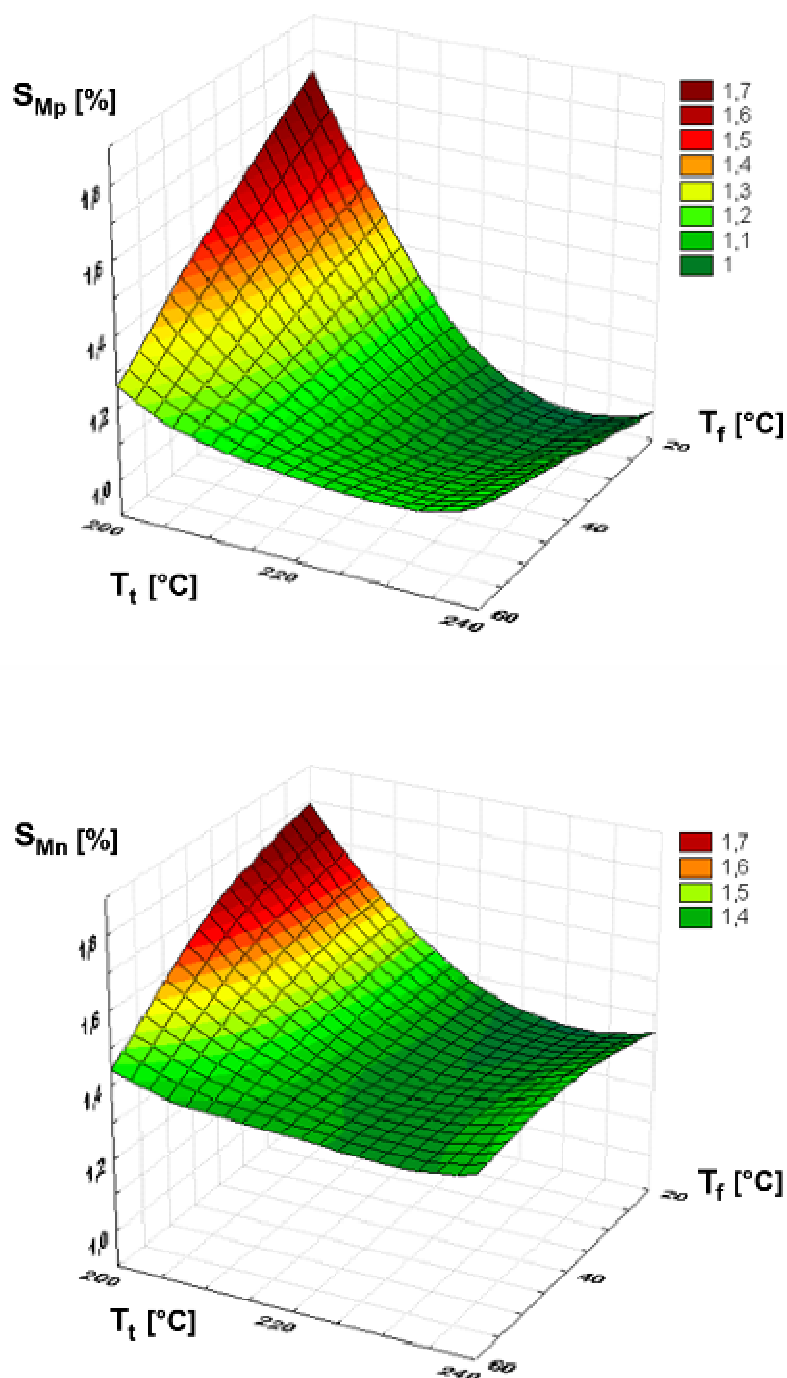
## 4.4 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 506

Pro možnost vzájemného porovnání materiálů a posouzení vlivu obsahu nanočástic na velikost výrobního smrštění byly změřeny také zkušební tělesa vyrobené z čistého polypropylénu Mosten GB 506. Hodnoty podélného i příčného smrštění jsou uvedeny v následujících tabulkách 24 a 25.

### 4.4.1 Vyhodnocení výrobního smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506

Tab. 24: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506

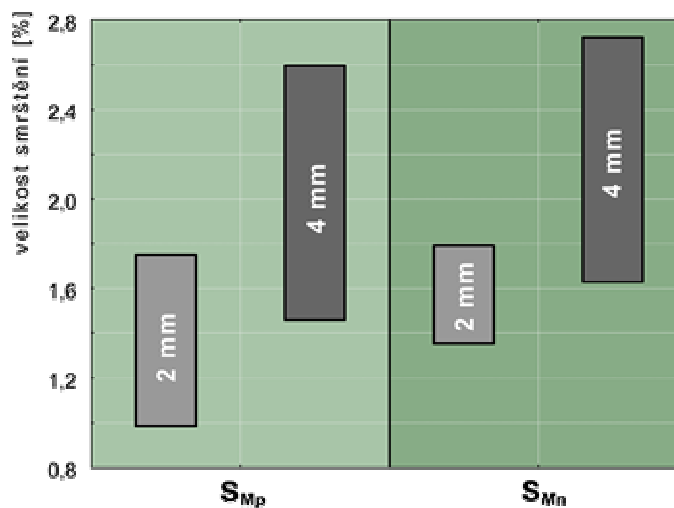
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	1,751	0,085	1,792	0,311
200 - 40	1,532	0,105	1,702	0,097
200 - 60	1,251	0,449	1,432	0,458
220 - 20	1,008	0,067	1,369	0,066
220 - 40	1,065	0,036	1,354	0,086
220 - 60	1,163	0,053	1,407	0,062
240 - 20	0,985	0,032	1,354	0,047
240 - 40	1,082	0,086	1,429	0,053
240 - 60	1,168	0,025	1,389	0,117



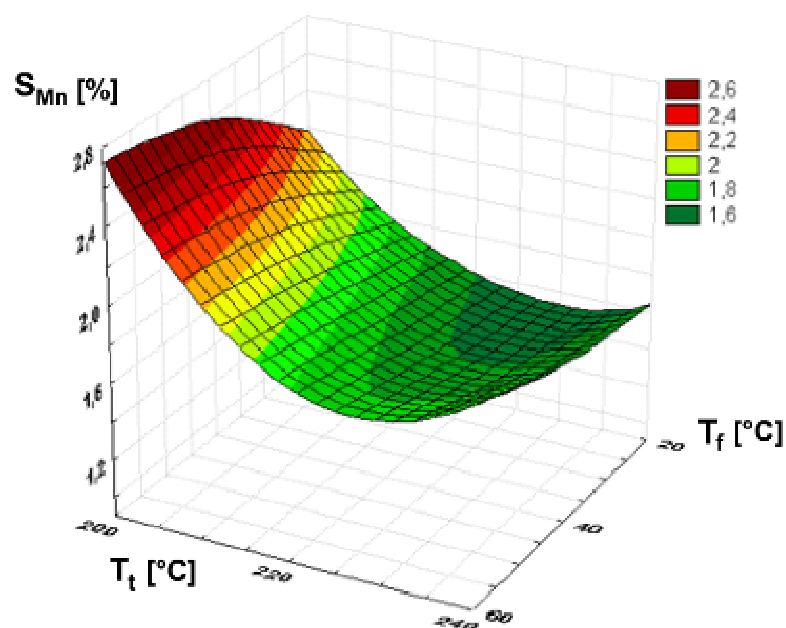
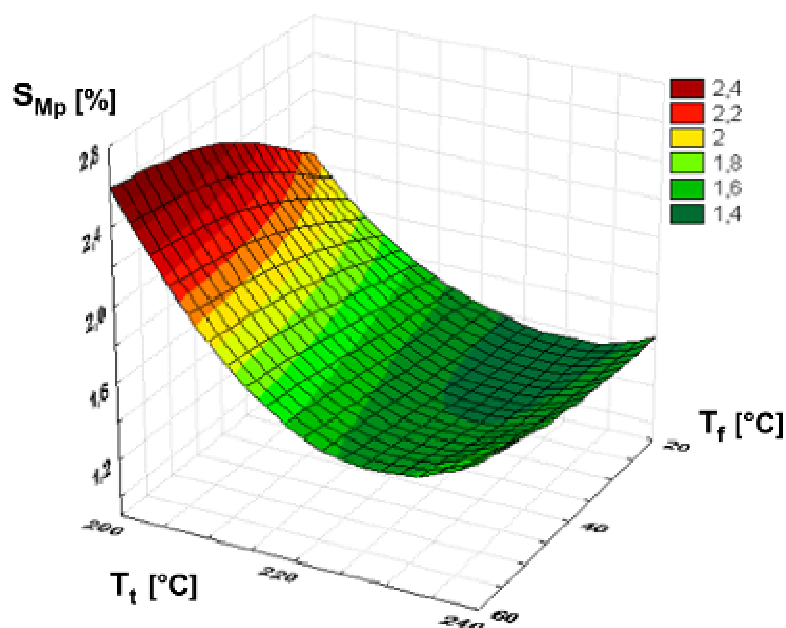
Obr. 85: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z materiálu PP Mosten GB 506

Tab. 25: Výrobní smrštění výstřiků z PP Mosten GB 506

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f$ [°C]	$S_{Mp}$	$\sigma$	$S_{Mn}$	$\sigma$
200 - 20	2,031	0,103	2,168	0,160
200 - 40	2,486	0,114	2,612	0,069
200 - 60	2,596	0,199	2,724	0,207
220 - 20	1,462	0,008	1,629	0,011
220 - 40	1,477	0,018	1,686	0,028
220 - 60	1,565	0,036	1,789	0,023
240 - 20	1,459	0,016	1,640	0,040
240 - 40	1,491	0,034	1,717	0,021
240 - 60	1,662	0,008	1,954	0,015



Obr. 86: Rozmezí výrobního smrštění v podélném a příčném směru pro materiál Mosten GB 506



Obr. 87: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf)  
pro 2mm vzorky z materiálu PP Mosten GB 506



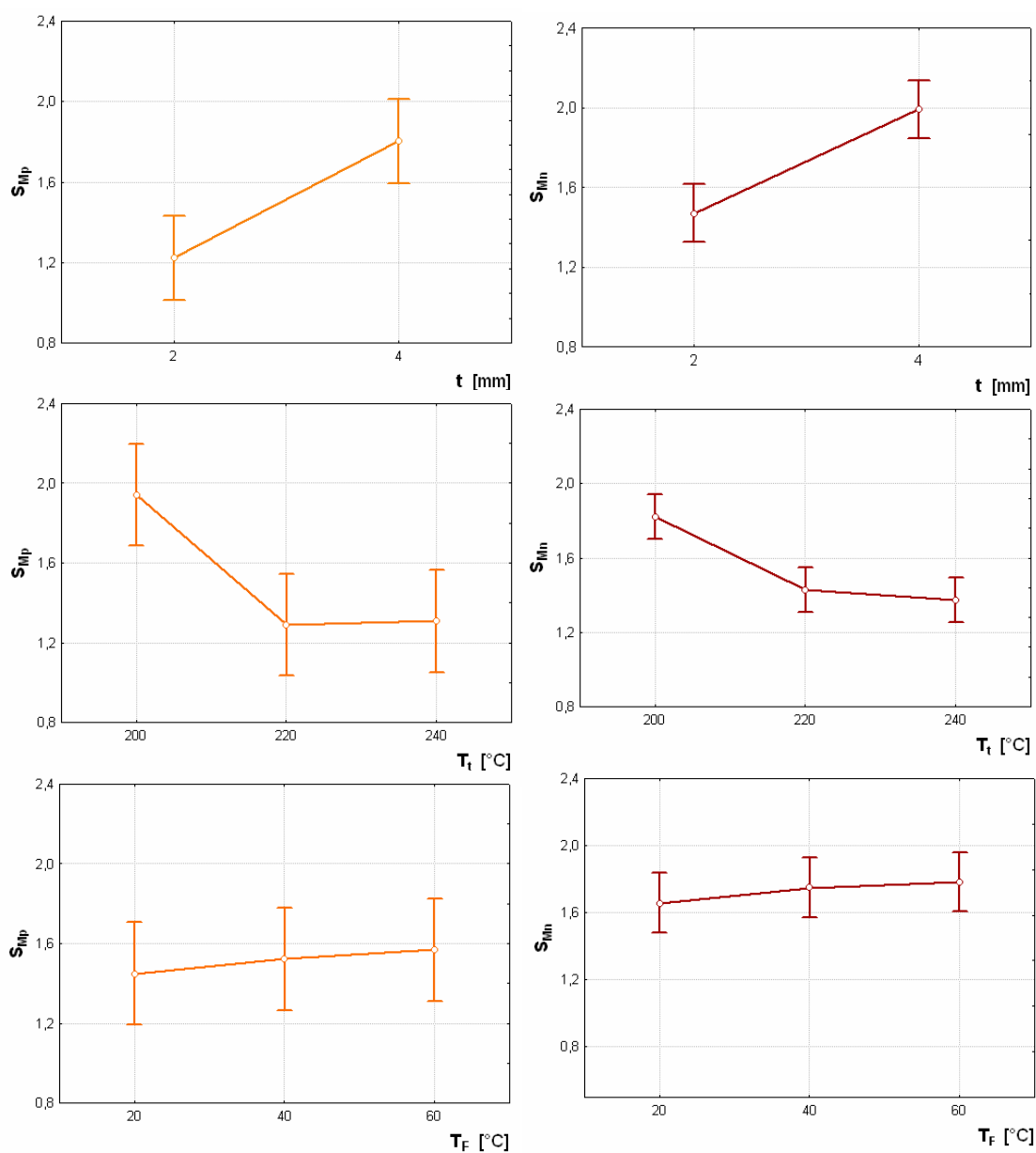
#### 4.4.2 Vyhodnocení naměřených výsledků pro materiál Mosten GB 506

Pro tloušťku dvou milimetrů byla naměřena nejnižší hodnota výrobního smrštění v podélném směru při nastavení teploty taveniny 240 °C a teploty formy 20 °C. Velikost tohoto smrštění byla 0,985%. Nejvyšší naměřená hodnota výrobního smrštění v podélném směru byla 1,751% a odpovídaly jí následující technologické parametry: teplota taveniny 200 °C a teplota formy 20 °C. V příčném směru bylo naměřeno minimum 1,354% a maximum 1,792%. Z průběhu proložených křivek naměřenými daty u grafů na obr. 85 můžeme vyčíst, že maximálních hodnot výrobního smrštění bylo dosaženo při nastavení minimálních velikostí měněných technologických parametrů. Na rozdíl od dvoumilimetrových vzorků mají čtyřmilimetrové vzorky výrobní smrštění vyšší s rostoucí teplotou formy. Interval hodnot pro výrobní smrštění u vzorků čtyři milimetry se pohybuje od 1,459 do 2,596% pro podélný směr a od 1,629 do 2,724% pro příčný směr. Rozdíly mezi měřenými rozměry ve směru toku taveniny a ve směru kolmém na tok taveniny byly v rozmezí od 0,041 – 0,369% pro 2 mm tloušťku a 0,126 – 0,292% pro tloušťku těles 4 mm.

#### 4.4.3 Výsledky analýzy rozptylu pro materiál Mosten GB 005

Tab. 26: Výsledky analýzy rozptylu pro Mosten GB 506

Hlavní efekty	Wilksova hodnota	F	p - Value
t	0,034	42,96	0,006*
T <sub>t</sub>	0,046	1,24	0,033*
T <sub>f</sub>	0,299	1,24	0,386
Interakce efektů	Wilksova hodnota	F	p - Value
t * T <sub>t</sub>	0,061	4,58	0,049*
t * T <sub>f</sub>	0,091	3,47	0,085*
T <sub>t</sub> * T <sub>f</sub>	0,352	0,51	0,811*



Obr. 88: Vlivy proměnných parametrů (faktorů) na výrobní smrštění v příčném a podélném směru pro materiál PP Mosten GB 506

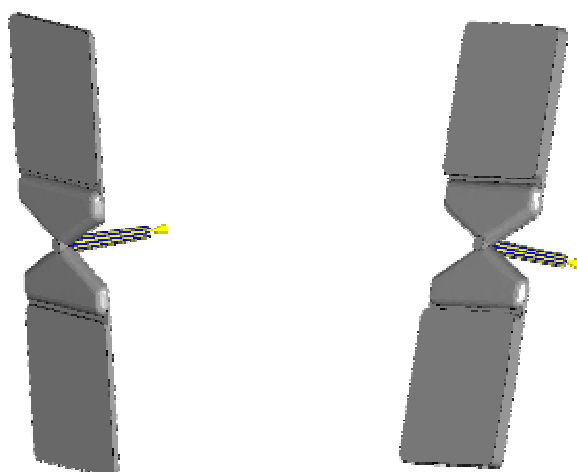
## 4.5 Počítačová simulace

Analýza procesu vstřikování simulačním programem Cadmould byla provedena na modelu výstřiku tvaru zkušebních těles použitých při experimentálním měření výrobního smrštění

### 4.5.1 Postup při výpočtu softwarové simulace [36]

Postup celého procesu simulace má své specifické kroky, které musí jít v dané posloupnosti tak, jak jsou dále podrobněji popsány. Nezbytným pomocníkem v některých příkladech byl přehledný uživatelský manuál.

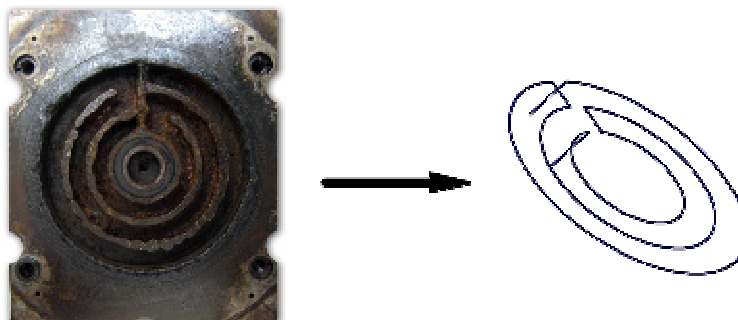
Digitální model výstřiku ve 3D byl vytvořen pomocí softwaru CATIA V5, který je díky rozsáhlým možnostem při modelování plošných povrchů, návrhu a výrobě forem, či kvalitnímu renderingu, velmi dobrým nástrojem. Digitální model byl namodelován podle rozměrů dutiny formy získaných z výkresové dokumentace formy. Hotový model byl uložen ve formátu \*.stl, který umí načíst simulační software Cadmould do svého pracovního prostředí.



*Obr. 90: 3D modely pro simulaci*

*(vlevo model s tloušťkou stěny 2mm, vpravo s tloušťkou stěny 4mm)*

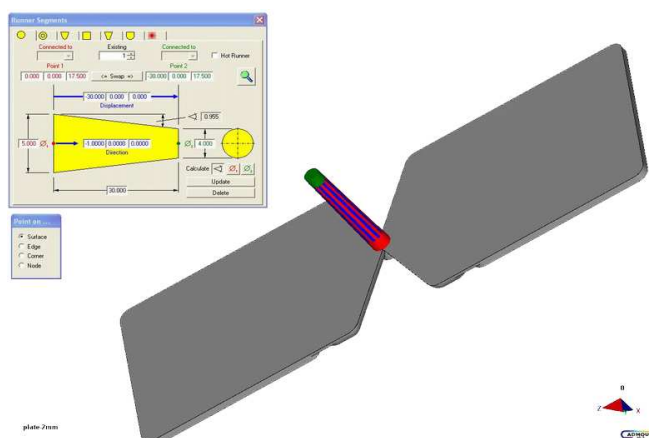
Schéma temperačních kanálů bylo podobně jako samostatný model vytvořeno mimo simulační software. Byl použit modul Shape – Generative shape design - programu CATIA V5. Podle výkresové dokumentace byly vytvořeny schématicky v prostoru pomocí úseček chladicí kanály, přičemž úsečky odpovídaly osám temperačních kanálů. Průměry se dodatečně přiřazují až v simulačním programu při definování podmínek simulace chlazení. Schéma chladících kanálů bylo z programu CATIA V5 vyexportováno ve formátu křivek - \*.iges (viz. obr. 91).



Obr. 91: Chladící kanály

(vlevo fotografie, vpravo 3D model chladících kanálů ve formátu křivek)

Model výstřiku byl následně do pracovního prostředí Cadmould naimportován. Dalším krokem bylo vytvoření vtokového kanálu. Software Cadmould umožňuje definovat různé průřezy vtokového kanálu. Pomocí dialogového okna byl zadán počáteční a koncový bod vtokového kanálu s definovaným rozměrem průměru (viz. obr. 92). Poté bylo nadefinováno umístění vstřikovací trysky.



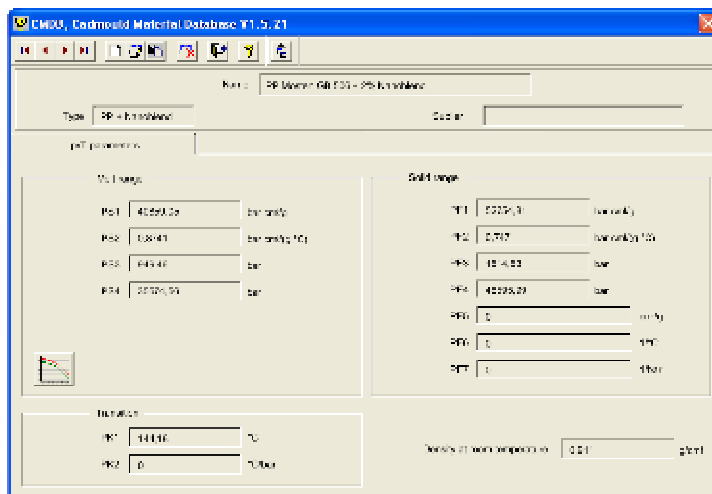
Obr. 92: Modelování vtokového kanálu

#### 4.5.2 Materiálová data pro simulaci

V dalším kroku bylo potřeba zvolit druh materiálu, ze kterého je výstřik vyroben. U převážné části simulačních výpočtů řešených v praxi lze použít materiál nalézt v rozsáhlé vnitřní databázi programu Cadmould, která se každým upgradem programu na vyšší verzi rozšiřuje o další desítky až stovky různých nových materiálů. Dále lze zvětšit výběr importováním materiálových dat pomocí databáze plastů CAMPUS.

Vstupní data potřebná pro simulační výpočet (mezi které samozřejmě patří materiálová data) rozhodují o přesnosti simulačního výpočtu a tím pádem i o jeho následné aplikaci v praxi. Materiálová data specifického materiálu (v našem případě PP s nanočásticemi) nelze nalézt ve standardní databance materiálů. V podobných případech lze postupovat následovně.

V programu Cadmould je materiál popsán pomocí řady koeficientů, které specifikují reologické chování plastu a jeho tepelné vlastnosti (viz. obr. 93).



Obr. 93: Dialogové okno z programu Cadmould pro pvT vlastnosti materiálu

Díky početnímu modulu firmy Simcom (obr. 94), který je dodáván spolu se softwarem Cadmould, je možno transformovat naměřená p-v-T a reologická data a získat tak potřebné výpočtové koeficienty, které přesně specifikují měřený materiál v programu Cadmould (viz. tab. 27).

7 Koeffizienten		
Koeffizient	Dimension	Material 1
PF1	bar cm <sup>3</sup> / g	52754.81
PF2	bar cm <sup>3</sup> / kg °C	0.747
PF3	bar	1514.53
PF4	bar	48595.89
PF5	cm <sup>3</sup> / g	8.13E-08
PF6	1 / °C	9.63E-02
PF7	1 / bar	3.14E-03
PS1	bar cm <sup>3</sup> / g	40859.05
PS2	bar cm <sup>3</sup> / g °C	0.8741
PS3	bar	949.46
PS4	bar	35574.56
PK1	°C	144.18
PK2	°C / bar	2.96E-02

Obr. 94: Pracovní prostředí početního modulu firmy Simcom

Tímto způsobem lze tedy pro simulaci použít i materiály velice specifické, jejichž materiálová data nejsou zatím obsažena v databázi programu.

Pro softwarovou simulaci byly z důvodu redukce měřených dat vybrány pouze dva materiály se společnou termoplastickou matricí s rozdílným procentem přidaného Nanoblendu 1201. Tyto koncentrace byly 2 a 4 hmotnostní % nanočástic a matrici tvořil PP Mosten GB 506.

Tab. 27: Přehled výpočtových koeficientů pro Cadmould

Koeficienty	Jednotky	PP Mosten GB 506 + 2 % Nanoblend 1201	PP Mosten GB 506 + 4 % Nanoblend 1201
PF1	$[\text{bar} \cdot \text{cm}^3/\text{g}]$	52754,81	47281,26
PF2	$[\text{bar} \cdot \text{cm}^3/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$	0,747	0,93
PF3	$[\text{bar}]$	1514,53	2110,49
PF4	$[\text{bar}]$	48595,99	44331,54
PF5	$[\text{cm}^3/\text{g}]$	$9,13 \cdot 10^{-8}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
PF6	$[1/^\circ\text{C}]$	$9,63 \cdot 10^{-2}$	$9,425 \cdot 10^{-2}$
PF7	$[1/\text{bar}]$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$2,773 \cdot 10^{-3}$
PS1	$[\text{bar} \cdot \text{cm}^3/\text{g}]$	40859,05	30756,64
PS2	$[\text{bar} \cdot \text{cm}^3/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$	0,8741	1,0605
PS3	$[\text{bar}]$	949,46	1301,58
PS4	$[\text{bar}]$	35574,56	27157,512
PK1	$[^\circ\text{C}]$	144,18	145,964
PK2	$[^\circ\text{C}/\text{bar}]$	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$2,61 \cdot 10^{-2}$

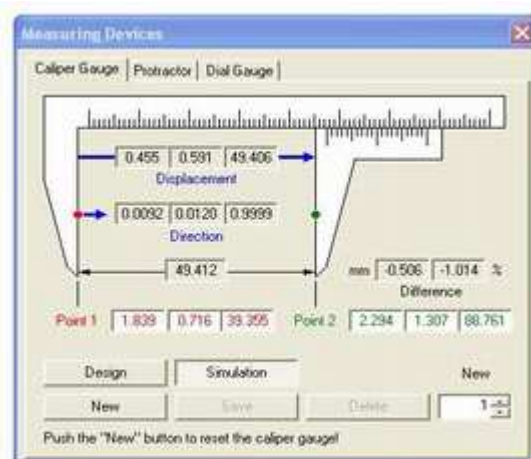
Data p-v-T byla pro vybrané materiály naměřena v Ústavu inženýrství polymerů Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na přístroji pro stanovení termodynamických charakteristik polymerních a jiných materiálů HAAKEE pvT100.

Naměřená p-v-T data jsou přiložena jako příloha 3.

Po provedené transformaci materiálových dat byl v dialogovém okně programu potvrzen výběr materiálu. Následovalo nastavení vlastních parametrů

průběhu vstřikování a dotlaku, které byly shodné jako při vlastním vstřikování zkušebních těles.

Před vlastním spuštěním simulace bylo nutné potvrdit nastavení k danému výpočtu pomocí ikony ID nalézající se v základním rozhraní programu. Pozdějším vyvoláváním identifikátoru je určeno, které nastavení např. technologických parametrů nebo konstrukčních úprav výstřiku a jím odpovídajícím výsledkům si chceme prohlížet a porovnávat je mezi sebou navzájem. Po nastavení všech doposud uvedených parametrů lze spustit vlastní simulační výpočet. Bez zadání teploty nástroje softwarem nelze vypočítat deformaci a smrštění plastového výstřiku a tak dalším krokem byla realizace temperační soustavy. Ihned po importování křivek temperační soustavy bylo provedeno definování průměrů všech kanálů. Takto vytvořenou soustavu temperačních kanálů lze i samostatně uložit. Následovalo nastavení průtoku a teplot proudícího média pomocí dalšího podokna programu.



Obr. 95: Dialogové okno programu Cadmould

Ikonkou Go v pravé části okna softwaru Cadmould byla spuštěna kompletní simulace, která bere v úvahu vliv teploty nástroje a počítá deformaci a smrštění výstřiků. Celkový výpočet trval zhruba 30 minut a končil simulací vyrovnání teploty výstřiku na okolní hodnotu prostředí a vypočítávání již uvedených hodnot deformací a smrštění plastového dílce. Podmínkou pro spuštění bylo nastavení všech uvedených hodnot a parametrů.

### 4.5.3 Výsledky počítačové simulace

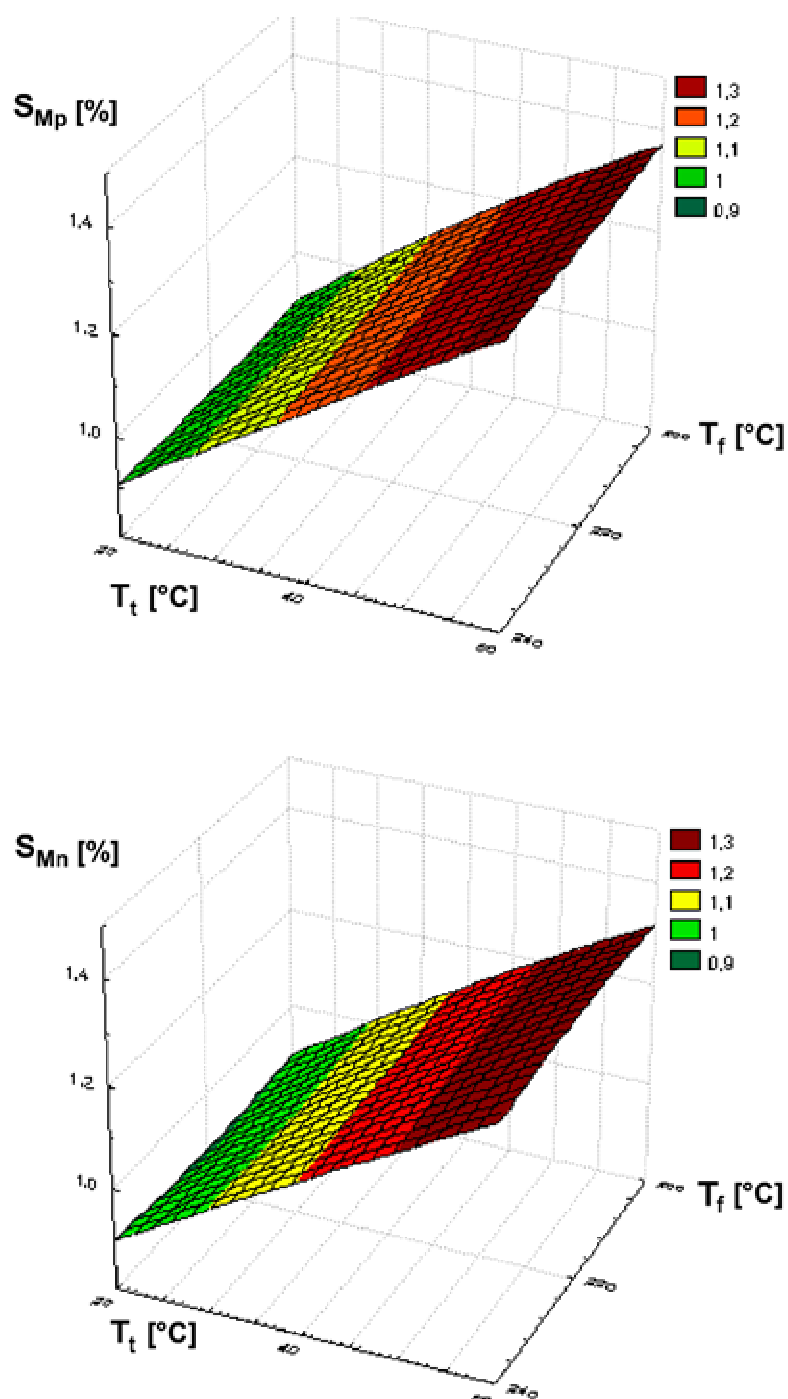
V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky získané při simulačních výpočtech pomocí softwaru Cadmould. V sousedících sloupcích tabulek jsou pro přehlednost vyneseny hodnoty výrobního smrštění v příčném a podélném směru získané měření pomocí digitálního úchylkoměru.

Po ukončení simulačních výpočtů nabízí program Cadmould celou řadu možností zobrazení výsledků. Na následujících obrázcích jsou uvedeny ukázky některých zobrazení a to jak pro 2 mm, tak i pro 4 mm vzorky.

Tab. 28: Porovnání výsledků získaných numerickou simulací a měření

Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$ simulace	$S_{Mp}$ naměřeno	$S_{Mn}$ simulace	$S_{Mn}$ naměřeno
200 - 20	0,901	1,108	0,897	1,389
200 - 40	1,154	1,122	1,122	1,406
200 - 60	1,370	1,159	1,315	1,414
220 - 20	0,895	1,130	0,884	1,417
220 - 40	1,145	1,148	1,109	1,411
220 - 60	1,361	1,368	1,325	1,551
240 - 20	0,907	1,313	0,898	1,589
240 - 40	1,131	1,556	1,102	1,769
240 - 60	1,354	1,570	1,298	1,798

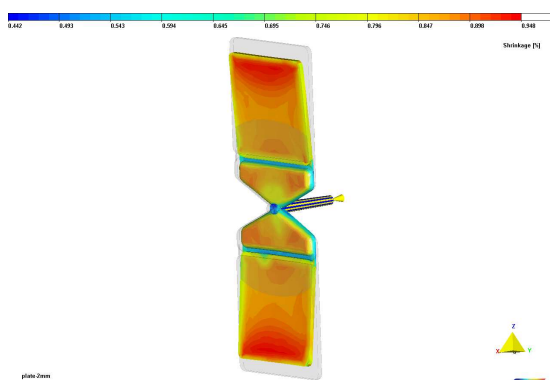




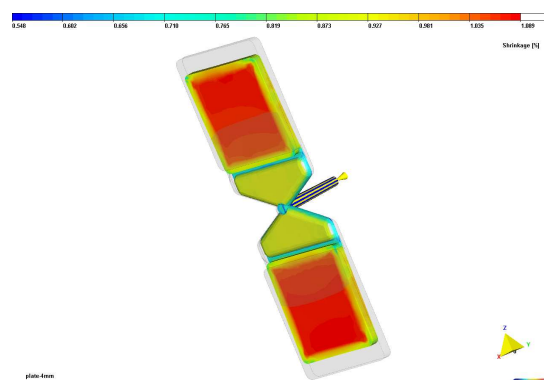
Obr. 96: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf) u simulačního výpočtu  
pro materiál PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Tab. 29: Porovnání výsledků získaných numerickou simulací a měřením

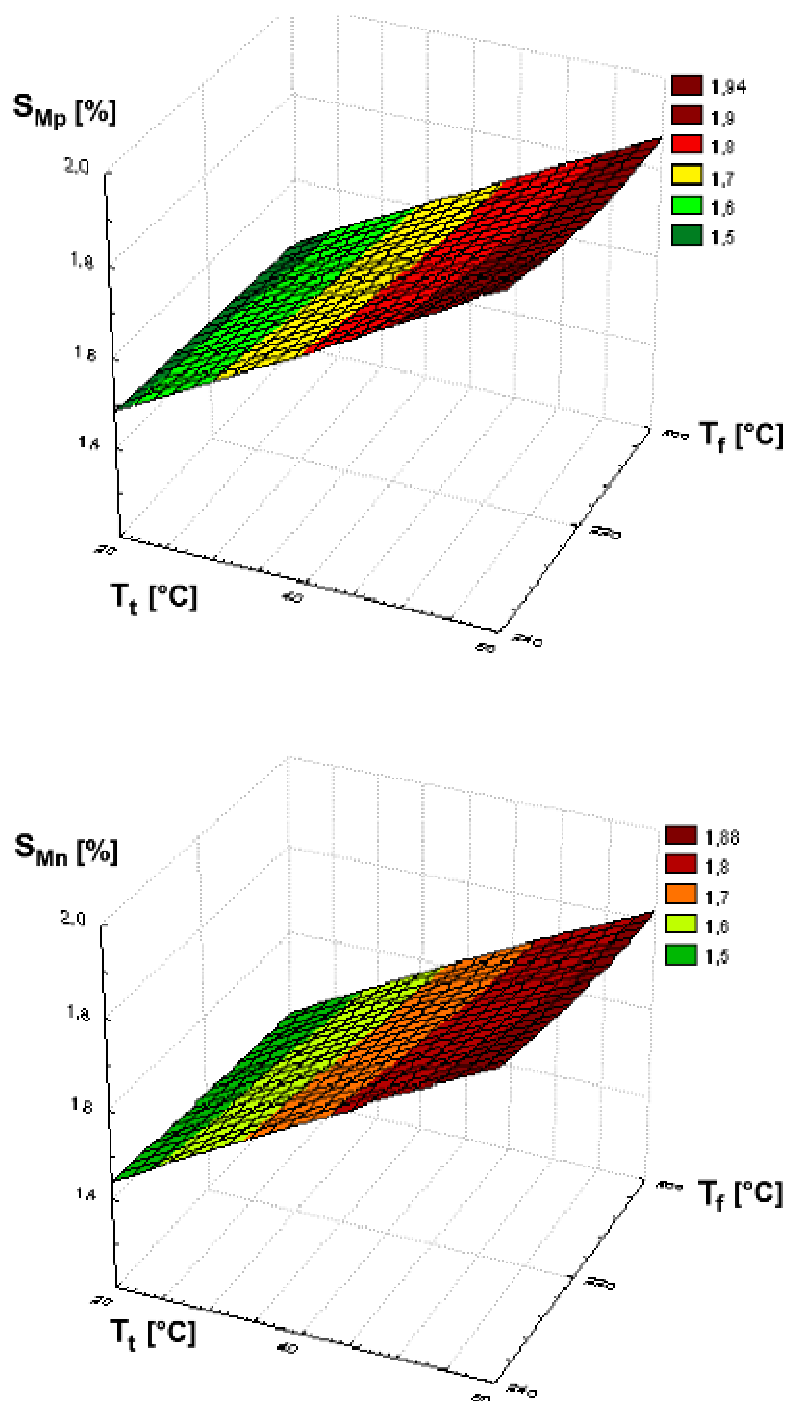
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	2 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$ simulace	$S_{Mp}$ naměřeno	$S_{Mn}$ simulace	$S_{Mn}$ naměřeno
200 - 20	1,454	1,389	1,410	1,931
200 - 40	1,663	1,406	1,624	2,029
200 - 60	1,867	1,414	1,820	2,317
220 - 20	1,470	1,417	1,426	1,683
220 - 40	1,681	1,411	1,644	1,934
220 - 60	1,871	1,551	1,834	2,143
240 - 20	1,485	1,589	1,442	2,480
240 - 40	1,704	1,769	1,666	2,546
240 - 60	1,938	1,798	1,886	2,614



Obr. 97: Hodnoty smrštění pro vzorek o tloušťce 2mm



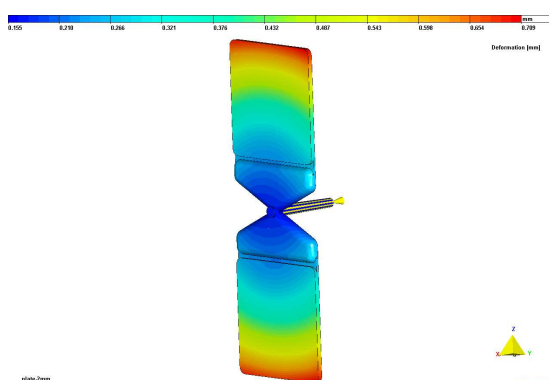
Obr. 98: Hodnoty smrštění spolu s deformací 4 mm vzorku



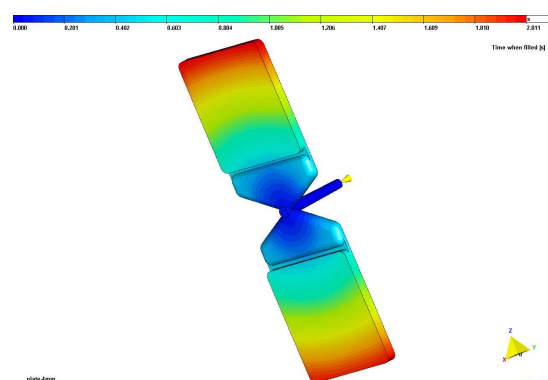
Obr. 99: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf) u simulačního výpočtu  
pro materiál PP Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201

Tab. 30: Porovnání výsledků získaných numerickou simulací a měřením

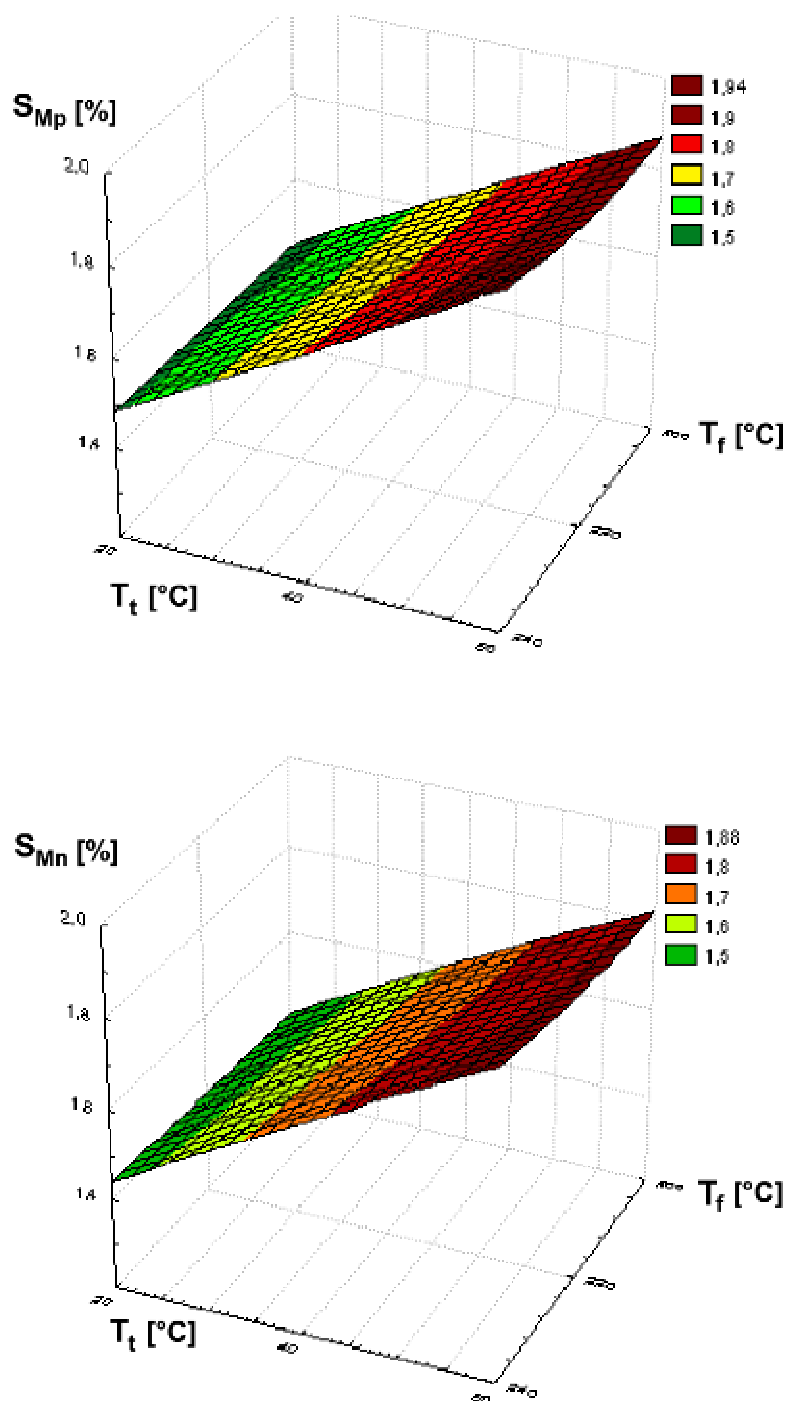
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	2 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$ simulace	$S_{Mp}$ naměřeno	$S_{Mn}$ simulace	$S_{Mn}$ naměřeno
200 - 20	1,059	1,236	0,901	1,457
200 - 40	1,242	1,156	1,154	1,440
200 - 60	1,399	1,202	1,370	1,469
220 - 20	0,975	1,062	0,895	1,366
220 - 40	1,170	1,168	1,145	1,449
220 - 60	1,381	1,570	1,361	1,789
240 - 20	0,988	1,319	0,907	1,640
240 - 40	1,234	1,336	1,131	1,583
240 - 60	1,382	1,451	1,354	1,803



Obr. 100: Hodnoty deformace  
u 2mm vzorku



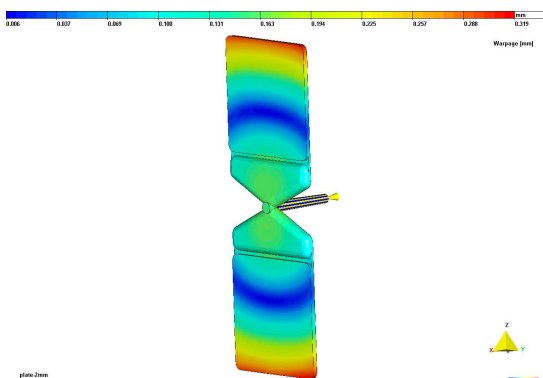
Obr. 101: Časový průběh plnění  
pro 4mm vzorek



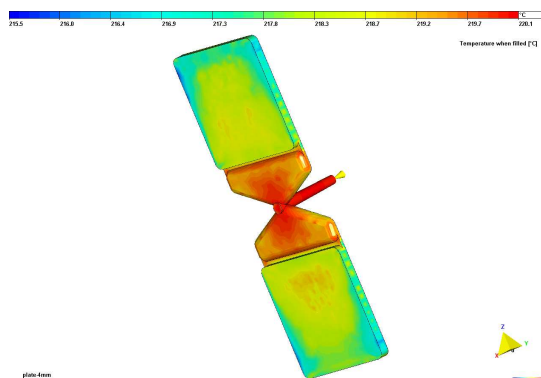
Obr. 102: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf) u simulačního výpočtu  
pro materiál PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

Tab. 31: Porovnání výsledků získaných numerickou simulací a měřením

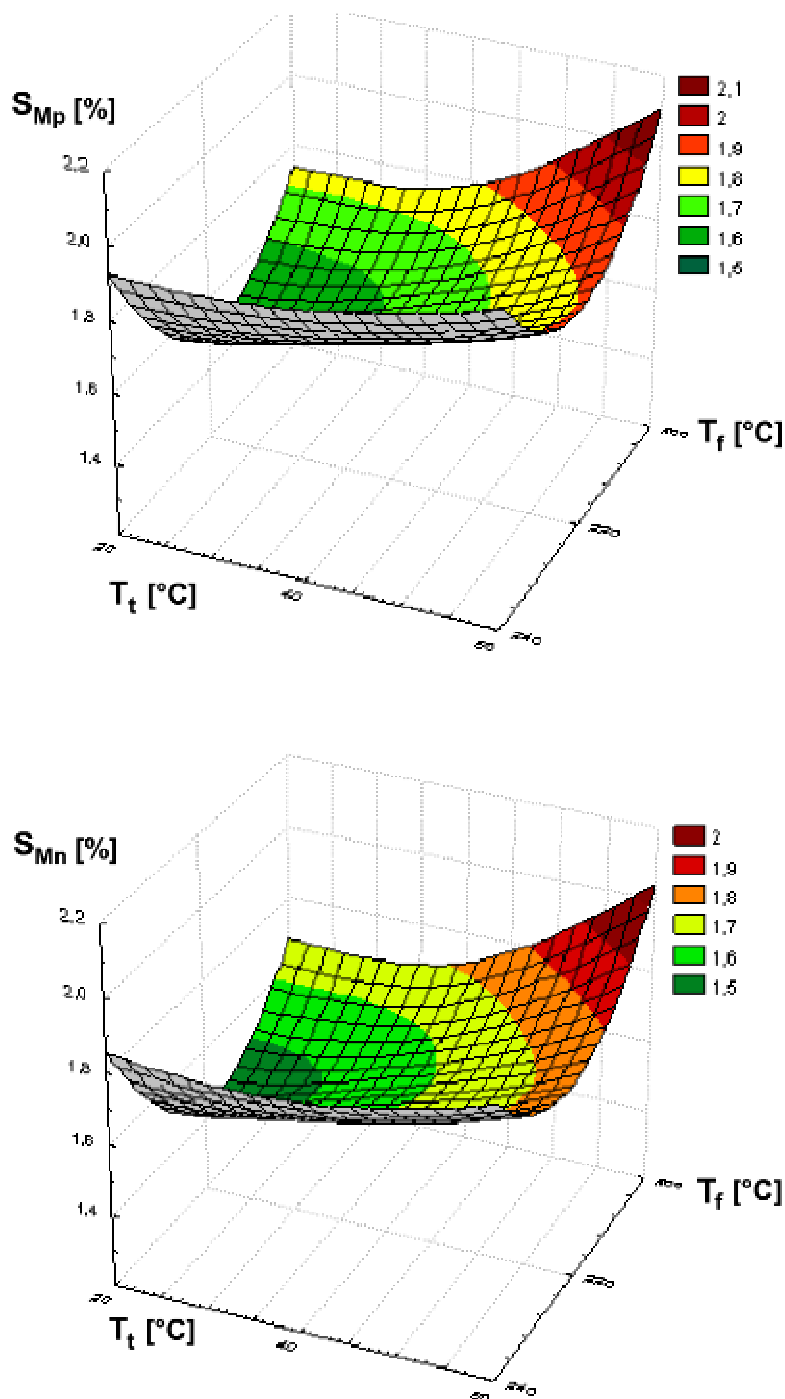
Výrobní smrštění $S_M$				
materiál	PP Mosten GB 506 + Nanoblend 1201			
koncentrace	4 %			
tloušťka desky	4 mm			
$T_t - T_f [^{\circ}\text{C}]$	$S_{Mp}$ simulace	$S_{Mp}$ naměřeno	$S_{Mn}$ simulace	$S_{Mn}$ naměřeno
200 - 20	1,745	1,442	1,688	1,566
200 - 40	1,768	1,517	1,695	1,657
200 - 60	2,116	1,625	2,050	1,783
220 - 20	1,485	1,605	1,421	1,846
220 - 40	1,648	1,580	1,599	1,934
220 - 60	1,808	1,973	1,751	2,291
240 - 20	1,928	1,699	1,858	2,031
240 - 40	1,945	1,911	1,835	2,437
240 - 60	2,065	2,039	1,952	2,494



Obr. 103: Velikost deformace pro  
vzorek o tloušťce 2 mm

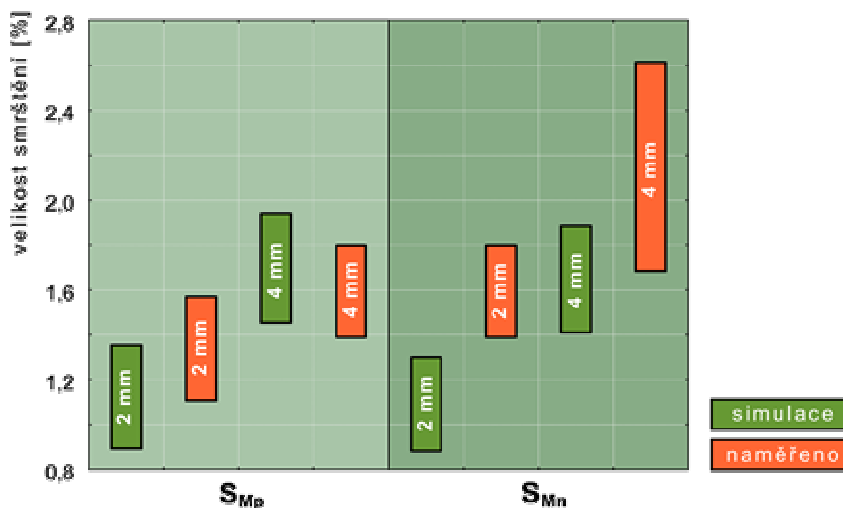


Obr. 104: Hodnoty teploty  
pro 4mm vzorek

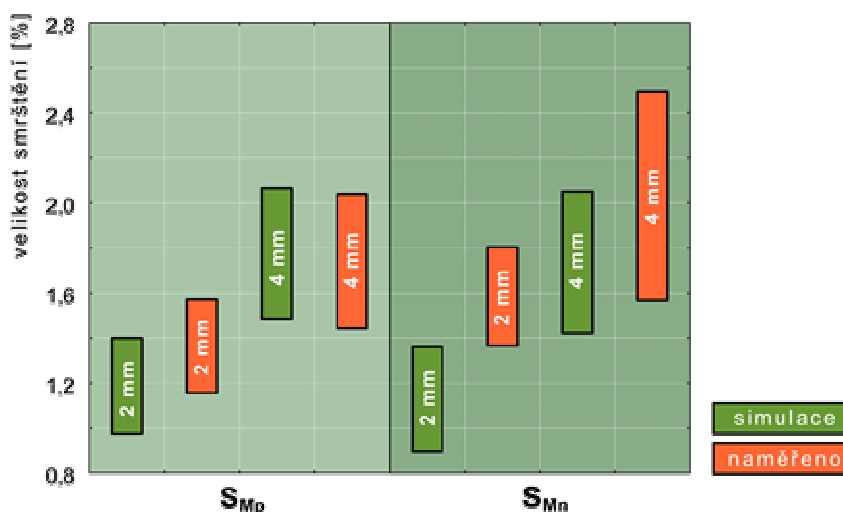


Obr. 105: 3D-graf výrobního smrštění v podélném (horní graf)  
a příčném směru (spodní graf) u simulačního výpočtu  
pro materiál PP Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201

V následujících grafech (obr. 106 a 107) jsou znázorněny rozmezí maximálních a minimálních hodnot výrobního smrštění a to jak hodnoty získané simulačními výpočty tak i hodnoty získané měřením zkušebních těles z Mostenu GB 506 se 2 a 4% přidaného Nanoblendu 1201.



Obr. 106: Maxima a minima výrobního smrštění v příčném a podélném směru pro materiál Mosten GB 506 + 2% Nanoblend 1201



Obr. 107: Maxima a minima výrobního smrštění v příčném a podélném směru pro materiál Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201



## 5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky předložené disertační práce přinášejí úplně nové poznatky v technologii vstřikování plastů, které jsou plněné nanočásticemi, a to v oblasti rozměrových změn výstřiků. Jedná se o úplně nový pohled na problematiku ve vztahu proces – rozměr, kdy při působení teplotně – napětových vztahů je pro neplněné plasty, ale i pro plasty plněné minerálním plnivem, skleněnými vlákny apod. problematika víceméně známá, ale v této oblasti se jedná o ojedinělý aplikovaný výzkum. Zatímco ve většině případů neplněných materiálů či materiálů plněných „klasickými“ plnivy lze nalézt hodnoty výrobního smrštění v materiálových listech, při použití nanočástic zůstávají konkrétní hodnoty smrštění a hlavně vliv nanočástic na velikost smrštění otevřenými otázkami. Smrštění není materiálovou konstantou, ale je závislé na tepelně mechanické historii dějů během vstřikování a případně i na dodatečných úpravách výstřiku. Hlavním záměrem této disertační práce bylo vyhodnocení vlivu vybraných základních materiálových, konstrukčních a technologických parametrů vstřikování na výrobní smrštění výstřiků ve tvaru desky z vybraných materiálů.

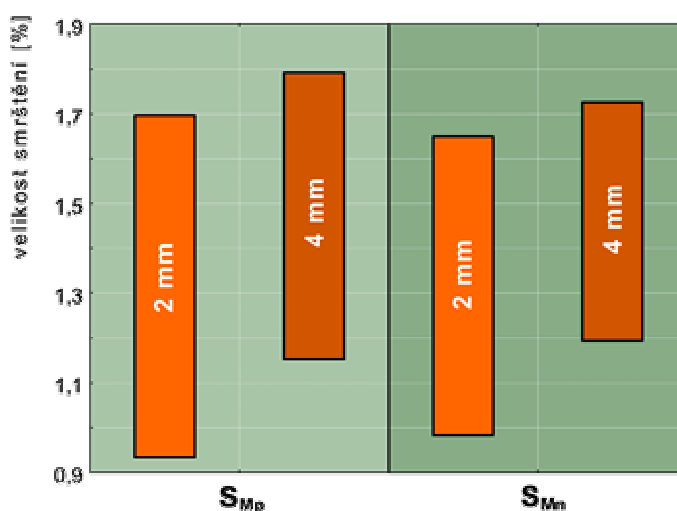
Hodnoty smrštění těchto materiálů byly v rámci experimentu naměřeny na výstřicích poměrně malých rozměrů a jednoduchého tvaru. Přesto lze, dle mého názoru, výsledky takto zjištěné využít i na odhad smrštění v jednotlivých místech výstřiku větších rozměrů a složitějších tvarů. Data získaná kombinací proměnných parametrů vyjadřují smrštění plastu za různých termodynamických podmínek a tloušťek stěn zkušebních těles. Pokud známe alespoň přibližné rozložení základních termodynamických veličin a tloušťek stěn ve větším výstřiku, lze hodnoty smrštění malých zkušebních těles, které byly vyrobeny za podobných termodynamických podmínek, použít pro odhad smrštění v jednotlivých místech výstřiku větších rozměrů. Sledování termodynamických veličin v libovolném místě výstřiku lze zajistit pomocí snímačů tlaku a teploty, což bývá poměrně složité a nákladné. Alternativním řešením mohou být softwarové simulace procesu vstřikování termoplastů, ze kterých lze výpočtem v libovolném místě výstřiku získat hodnoty termodynamických veličin.

V následujících kapitolách jsem se snažil pro zjištěné hodnoty a měněné (materiálové, technologické a konstrukční) parametry vypracovat matematické závislosti, které by vedly k výpočtu smrštění při změně hodnot. Tyto rovnice jsou

diskutabilní pro svoji přesnost (při sestavování rovnic procházela proložená funkce středními hodnotami naměřených veličin) a pro úzké rozpětí materiálů (byly použity 2 polypropylénové matrice a 1 typ nanočástic). Pro obecněji použité matematické závěry by bylo nutné provést měření smrštění na dalších rozdílných materiálech s rozdílnou základní maticí a také provést měření pro další typy a koncentrace nanočástic.

## 5.1 Vliv parametrů vstřikování na výrobní smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Zjištěné hodnoty výrobního smrštění se u výstřiků z materiálu PP Mosten GB 005 + Nanoblend 1201 pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,934 – 1,679 % a 1,153 – 1,791 % u zkušebních těles 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,982 – 1,650 a pro tloušťku 4 mm 1,193 – 1,725 % (viz. obr. 106). Výrobní smrštění polypropylénu Mosten GB 005 bez přidaných nanočástic v podélném směru se pohybovalo v rozmezí 0,963 – 1,643 % a v příčném směru 1,056 – 1,744 % pro 2 mm vzorky. U vzorků s tloušťkou 4 mm bylo rozmezí výrobního smrštění naměřeného v podélném směru 1,514 – 2,179 % a pro příčný směr pak 1,526 – 2,059 % (viz. obr. 82).



Obr. 108: Rozmezí naměřených hodnot  $S_{Mp}$  a  $S_{Mn}$   
pro Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

Teplota taveniny ovlivňuje rychlost krystalizace u semikrystalických plastů. Se zvýšením teploty taveniny dojde k částečnému zpomalení krystalizace. Z výsledků ANOVY na obr. 70 je patrné, že s rostoucí teplotou taveniny klesá velikost smrštění a to v obou měřených směrech. Průběhy podélného a příčného smrštění v závislosti na velikosti  $T_t$  lze v tomto případě matematicky vyjádřit pomocí kvadratických rovnic:

Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_t^2 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_t + 1,32 \quad (32)$$

$$S_{Mn} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 7,05 \cdot 10^{-2} \cdot T_t + 9,5 \quad (33)$$

Mosten GB 005

$$S_{Mp} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 1,41 \cdot 10^{-1} \cdot T_t + 17,83 \quad (34)$$

$$S_{Mn} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 1,91 \cdot 10^{-1} \cdot T_t + 23,7 \quad (35)$$

Dle teoretických předpokladů by měl být vliv dalšího proměnného parametru experimentu – teploty formy – na velikost výrobního smrštění následující: S rostoucí teplotou formy dochází k lepšímu zabíhání taveniny ve formě a následné chlazení výstřiku probíhá rovnoměrněji a pomaleji, což se projeví nižším vnitřním pnutím a lepšími mechanickými vlastnostmi výstřiku. Zlepšuje se i stabilita tvaru a rozměrů. S vyšší teplotou formy roste velikost smrštění (viz. obr. 33). Tyto teoretické předpoklady byly splněny pro vzorky vyrobené nad teplotou formy 40°C, kdy dochází s postupným nárůstem teploty formy i k nárůstu velikostí podélného a příčného smrštění (viz. obr. 70). Následující rovnice popisují průběh středních hodnot smrštění v závislosti na velikosti  $T_f$ :

Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,32 \quad (36)$$

$$S_{Mn} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 - 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,33 \quad (37)$$

Mosten GB 005

$$S_{Mp} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,54 \quad (38)$$

$$S_{Mn} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 - 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,39 \quad (39)$$

Přidané nanočástice Nanoblendu 1201 k základní termoplastické matici tvořené polypropylénem Mosten GB 005 ovlivňují nelineárně velikost výrobního smrštění (viz. rovnice 40 a 41). Smrštění v podélném a příčném směru roste se zvyšujícím se procentem přidávaného Nanoblendu 1201.

Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 6 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 + 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot N + 1,25 \quad (40)$$

$$S_{Mn} = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot N + 1,31 \quad (41)$$

Se zvětšením tloušťky stěny roste i čas potřebný k ochlazení výstřiku, dochází k relaxaci vnitřního pnutí a výsledné smrštění silnějších stěn je větší než u tenkostěnných výrobků. V případech zkušebních těles vyrobených z polypropylénu Mosten GB 005 a to jak bez přítomnosti přidávaných nanočástic, tak i ve všech případech rozdílných koncentrací nanoplniva, bylo podélné i příčné smrštění větší s rostoucí tloušťkou zkušebních vzorků. Závislost středních hodnot  $S_{Mp}$  a  $S_{Mn}$  na velikosti tloušťky stěny lze popsat následujícími rovnicemi:

Mosten GB 005 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 3,25 \cdot t - 2,51 \quad (42)$$

$$S_{Mn} = 3,22 \cdot t - 2,44 \quad (43)$$

Mosten GB 005

$$S_{Mp} = 3,77 \cdot t - 3,54 \quad (44)$$

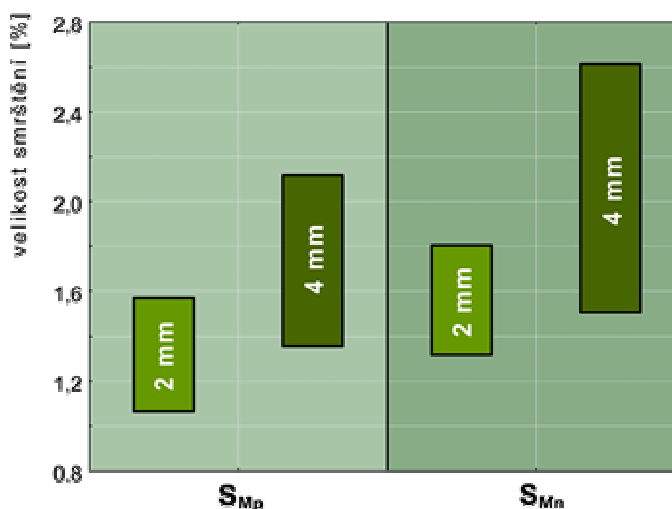
$$S_{Mn} = 3,77 \cdot t - 3,55 \quad (45)$$

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na vliv velikosti výrobního smrštění pro materiál Mosten GB 005 s různou koncentrací Nanoblendu 1201 má největší vliv tloušťka výstřiku. Druhým nejvýznamnějším vlivem je velikost obsahu nanočástic v základní termoplastické matici. Tato zjištěná skutečnost podporuje možnost využití změny koncentrace nanoplniva k účinnému ovlivňování hodnot výrobního smrštění výstřiků. Pro konkrétní aplikace je však nutné vzít v úvahu možné ovlivnění např. mechanických vlastností výsledného dílu. Z interakcí

vyhodnocovaných parametrů má statisticky největší vliv na výrobní smrštění teplota taveniny \* tloušťka a kombinace teplota formy \* teplota taveniny.

## 5.2 Vliv parametrů vstřikování na výrobní smrštění výstřiků z materiálu Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

U výstřiků vyrobených z materiálu Mosten GB 506 s různými procenty přidávaných nanočástic se v podélném směru pohybovalo výrobní smrštění v rozsahu 1,062 – 1,570 % u 2 mm vzorků a v příčném směru 1,371 – 1,803 %. Pro tloušťku výstřiků 4 mm a podélný směr bylo naměřené rozmezí výrobního smrštění 1,354 – 2,116 % a pro příčný směr 1,506 – 2,614 %.



Obr. 109: Rozmezí naměřených hodnot  $S_{Mp}$  a  $S_{Mn}$  pro Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

Při výrobě zkušebních těles z polypropylénu Mosten GB 506 bez přidávaných nanočástic bylo naměřeno výrobní smrštění v podélném směru 0,975 – 1,751 % a v příčném směru 1,354 – 1,792 % pro 2mm tloušťku vzorků. U 4 mm tloušťky těles se pohybovaly hodnoty výrobního smrštění v podélném směru 1,459 – 2,596 % a v příčném směru 1,629 – 2,724 % (viz. obr. 86).

Vliv teploty taveniny na velikost výrobního smrštění u kombinace měřených materiálů, kde polypropylén Mosten GB 506 sloužil jako termoplastická matrice, lze popsat následujícími rovnicemi:

## Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 7,63 \cdot 10^{-2} \cdot T_t + 9,15 \quad (45)$$

$$S_{Mn} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 1,32 \cdot 10^{-1} \cdot T_t + 15,5 \quad (46)$$

## Mosten GB 506

$$S_{Mp} = 9 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 4 \cdot 10^{-1} \cdot T_t + 46,95 \quad (47)$$

$$S_{Mn} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot T_t^2 - 1,55 \cdot 10^{-1} \cdot T_t + 19,73 \quad (48)$$

Při experimentálním měření byla dalším měněným parametrem teplota formy. Vliv její velikosti na velikost smrštění v podélném a příčném směru lze vyjádřit rovnicemi:

## Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot T_f^2 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,44 \quad (49)$$

$$S_{Mn} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot T_f^2 - 1,87 \cdot 10^{-2} \cdot T_f + 1,88 \quad (50)$$

## Mosten GB 506

$$S_{Mp} = -1 \cdot 10^{-4} \cdot T_f^2 + 1,38 \cdot 10^{-2} \cdot T_f + 1,17 \quad (51)$$

$$S_{Mn} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,63 \quad (52)$$

Se zvyšováním teploty formy a tím pádem i času potřebného k ochlazení dílu rostlo i výrobní smrštění.

O vlivu procentuálního obsahu nanočástic na smrštění vypovídají následující matematické závislosti:

## Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \cdot N + 1,59 \quad (53)$$

$$S_{Mn} = -9,4 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 2,65 \cdot 10^{-2} \cdot N + 1,85 \quad (54)$$

Posledním měněným parametrem byla tloušťka vstřikovaných zkušebních těles. Velikost smrštění byla změnou tloušťky ovlivněna:

Mosten GB 506 + Nanoblend 1201

$$S_{Mp} = 3,05.t - 2,11 \quad (55)$$

$$S_{Mn} = 3,98.t - 3,99 \quad (56)$$

Mosten GB 506

$$S_{Mp} = 2,93.t - 1,86 \quad (57)$$

$$S_{Mn} = 3,88.t - 3,77 \quad (58)$$

Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) ukazují, že mezi parametry s největším vlivem na velikost výrobního smrštění pro materiály plněné nanočásticemi s matricí Mostenu GB 506 patří na prvním místě tloušťka stěny a za ní následuje teplota taveniny. Vlivu interakcí efektů dominuje opět kombinace parametrů tloušťka \* teplota taveniny. Ostatní interakce parametrů již nejsou na rozdíl od předešlé dvojice tak statisticky významné (viz. tab. 20).

Při vyhodnocování vlivů proměnných parametrů byla snaha nalézt určitou matematickou závislost, která by zohledňovala podíl jednotlivých vstupních efektů (tloušťka, teplota taveniny, teplota formy, hmotnostní procento nanočástic) na velikosti smrštění v příčném a podélném směru. Bohužel žádné z provedených výpočtů nevedly k získání takovéto závislosti.

### 5.3 Zhodnocení výsledků softwarové simulace

Výsledky numerické simulace programu Cadmould se od hodnot naměřených v experimentu značně liší (viz. tab. 28 – 31). Největší odchylka mezi simulací a naměřenými rozměry je u materiálu Mosten GB 506 + 2% Nanoblendu 1201 0,425 % u 2mm tloušťky v podélném směru a v příčném směru je 0,691%. Pro 4mm tloušťku činí rozdíl v podélném směru 0,453 % a v příčném směru 1,038%. U druhého materiálu, pro který byla provedena softwarová simulace (Mosten GB 506 + 4% Nanoblend 1201), byla difference mezi  $S_{Mp}$  0,197% a  $S_{Mn}$  0,733% u 2mm vzorků. Pro 4mm tloušťku byl rozdíl v podélném směru 0,491% a v příčném směru 0,602%. Jak je patrné, rozdíly mezi výsledky získané simulací a hodnotami naměřenými v experimentu, jsou značně velké a mnohdy dosahují až

40%. Tyto rozdíly mohou být způsobeny faktem, že v těchto případech nelze úplně přesně pomocí počítačové simulace definovat reálné podmínky při vstřikování zkušebních těles. Dalším důvodem difference mezi výsledky softwarového výpočtu a výsledky naměřené při experimentu může být transformace naměřených p-v-T dat na materiálové koeficienty programu Cadmould pomocí početního modulu firmy Simcon. Při specifikaci měřeného materiálu lze v programu Cadmould zohlednit reologické vlastnosti materiálu pomocí rozšiřujících materiálových konstant. Pomocí těchto koeficientů by se mohl následující provedený softwarový výpočet posunout blíže k reálnému stavu. Experimentální měření bylo provedeno bez tlakových a teplotních čidel ve formě a proto nelze porovnat termodynamické podmínky experimentu a simulace. Také byly pro simulační výpočet vybrány pouze dva zástupci materiálových variací a vzniklé výsledky numerického výpočtu nejsou dostačující k obecným závěrům.



## 6. ZÁVĚR

Předložená disertační práce na téma rozměrových změn matric PP s nanoplnivem je příspěvkem k problematice rozměrových změn u dílů vyráběných technologií vstřikování.

Experimentální část je zaměřena na posouzení vlivu jednotlivých vybraných parametrů na výrobní rozměrové změny výstřiků. Výrobní smrštění je zde posuzováno na zkušebních tělesech o rozměru 50x50 mm a dvou rozdílných tloušťkách (2 a 4 mm).

Výsledky práce lze shrnout do následujících bodů:

1. V teoretické části práce jsou shrnuty základní poznatky o vlivech na rozměrové změny pro výstřiky z termoplastů. Tyto vlivy jsou rozděleny na technologické a konstrukční. Z rozboru sledované problematiky vyplývá, že na velikost smrštění působí velké množství faktorů, které se vzájemně ovlivňují, což činí problematiku rozměrových změn výstřiků poměrně značně složitou.
2. V rámci experimentu byl pomocí faktorové analýzy rozptylu vypracován rozbor vlivu základních podmínek na velikost výrobního smrštění nanokompozitů s termoplastickou matricí. Vlivy hodnocených parametrů na rozměrové změny jsou přehledně zobrazeny pomocí souhrnných grafů (viz. kap. 4, obr. 70 a 80).
3. Výsledky numerické simulace vstřikování provedené v programu Cادمould pro vybrané materiály (Mosten GB 506 s 2% a 4% Nanoblendu 1201) jsou v porovnání s experimentálními daty značně rozdílné.

Vlastní přínosy práce:

Práce přináší nové poznatky v oblasti problematiky rozměrových změn při zpracování plněných plastů nanočásticemi. Popsanou metodiku zjištění výrobního smrštění lze úspěšně použít k odhadu hodnot výrobního smrštění na konkrétních plastových dílech. Přestože dochází v praxi k expanzi využití výhodných vlastností polypropylénů plněných nanočásticemi, o velikosti výrobního smrštění nejsou v odborné literatuře uváděny konkrétní hodnoty. V práci jsou uvedeny hodnoty výrobního smrštění pro 2 představitele polypropylénových materiálů (homopolymer a kopolymer) s rozdílnými obsahy nanočástic a lze tak získat

poměrně jasnou představu o hodnotách smrštění u dílů vyrobených z materiálů plněných nanočásticemi. Přínosy práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Možnost predikce rozměrů dílů na základě změn technologických parametrů s využitím získaných matematických vztahů.
2. Stanovení vlivu částic o rozměru  $10^{-9}$  a jejich procentuálního obsahu na změnu výrobního rozměru.
3. Stanovení vlivu tloušťky výstřiku na velikost výrobního smrštění u materiálů plněných nanočásticemi.
4. Použití metodiky simulačního výpočtu pro specifické materiály (plněné nejen nanočásticemi), které nejsou standardně uváděné v materiálových databázích a následné zpětné porovnání simulačních výsledků s reálnými daty.

Jsem si vědom, že tato disertační práce řeší jen určitou část problematiky rozměrových změn výstřiků z nanokompozitů. Rozsah experimentálního měření nepokryl všechny možné kombinace proměnných vstupních faktorů, které jsou nutné k získání obecnějších závěrů. Při řešení práce nebyly také uvažovány vlivy rychlosti plnění dutiny formy, doby dotlaku, druhu vtokového ústí apod. Je též potřeba porovnat více typů polymerních materiálů plněných nanočásticemi.

Výsledky práce je možné použít ke korekcím rozměrů výstřiků pomocí procentuálního zastoupení nanočástic či pro přesnější návrh rozměrů dutin vstřikovacích forem. Výsledky softwarové simulace vstřikování nanokompozitních materiálů lze zpřesnit detailnější specifikací vstupních materiálových dat a použít jako návod numerické simulace nejen pro materiály s nanočásticemi.

## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DI VENTRA, M.; EVOY, S.; Heflin, J. R.: Introduction to Nanoscale Science and Technology, KAP, 2004. ISBN 9781402077203
- [2] NALWA, H. S.: Polymeric Nanostructures and Their Applications. 2006. ISBN 1-58883-068-3
- [3] TSAKALOS T. a kol.: Nanostructures: Synthesis, Functional Properties and Applications. Springer, 2003. ISBN 1402017529
- [4] FRIEDRICH, K.; FAKIROV, S.; ZHANG Z.: Polymer Composites: From Nano to Macro Scale, Springer, 2005. ISBN 0387241760
- [5] COMMITTEE ON IMPLICATIONS OF EMERGING MICRO AND NANOTECHNOLOGIES: Implications of Emerging Micro and Nanotechnologies. National Academies Press, 2004. ISBN 030908623X
- [6] VACCA, J.: Nanotechnology. Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0-12-370524-2
- [7] TIMP, G. L.: Nanotechnology. Springer, 1999. ISBN 0387983341
- [8] LIN WANG, Z.; LIU, Y.; ZHANG Z.: Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials. Springer, 2004. ISBN 9780306467370
- [9] PIERRE, A. C.: Introduction to SOL-GEL Processing. Springer, 1998. ISBN 0792381211
- [10] HOSOKAWA, M., NOGI, K., NAITO, M.: Nanoparticle Technology Handbook. Elsevier, 2007. ISBN 044453122X
- [11] BRUMEL, M. a kolektiv: Rozměrově přesné výrobky z plastů. Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1977.
- [12] <http://plastics.bayer.com>
- [13] SOVA, M.; KREBS, J.: Termoplasty v praxi. Verlag Dashoefer, Praha, 2002.
- [14] RIPATHI, D.: Practical Guide to Polypropylene. Rapra Technology, UK, 2002. ISBN 978-1-85957-282-5
- [15] KOVALČÍKOVÁ, M.: Možnosti PP vo svete plastov. Plasty a kaučuk, 2004, roč. 41., č. 1. ISSN 0322-7340.
- [16] BAREŠ, R.A.: Kompozitní materiály. SNTL, Praha, 1988.
- [17] KUŽVART, M.; WEISS, Z.: Jílové minerály. 2005, ISBN 80-246-0868-5
- [18] MĚŘICKÁ, D.: Jílové materiály jako nanoplniva, jejich úprava a kompozice. Plasty a kaučuk, 2005, roč. 42., č. 3 – 4. ISSN 0322-7340.
- [19] POKROPIVNY, V.V.; SKOROKHOD, V.V.: Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. Materials Science and Engineering, . Elsevier Sien, 2006.
- [20] KALANDOVÁ, A.: Možnosti přípravy nanokompozitních systémů typu polymer / jíl a metody jejich vyhodnocení. Plasty a kaučuk, 2004, roč. 41., č. 3. ISSN 0322-7340.

- [21] MEYERS, M.A.; RITCHIE, R.O.; SARIKAYA, M.: Nano and Microstructural Design of Advanced Materials. Elsevier Science, 2003. ISBN 0080443737.
- [22] EXNER, P.: Metoda sol-gel. TU v Liberci, Liberec, 2006. ISBN 80-7372-063-9.
- [23] LAPČÍK, L'; RAAB, M.: Nauka o materiálech II. UTB ve Zlíně, Zlín, 2000. ISBN 80-238-6527-7.
- [24] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů – část 1. TU v Liberci, Liberec, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [25] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: Fyzika polymerů. SNTL, Praha, 1987. ISBN 04-634-87.
- [26] ZOLLNER, O.: The Fundamentals of Shrinkage of Thermoplastics. Bayer Material Science AG, 2004.
- [27] KOLOUCH, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. SNTL, Praha, 1986.
- [28] EHRENSTEIN, G.W.: Polymeric materials. Hanser Gardner Publications, 2001. ISBN 1-56990-310-7.
- [29] ŠTĚPEK, J.; ZELINGER, J.; KUTA, A.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTL, Praha, 1989.
- [30] VOHLÍDAL J.: Makromolekulární chemie. UK Praha, Praha, 1995.
- [31] KOLOUCH, J.: Strojní součásti z plastů. SNTL, Praha, 1981.
- [32] BOWN, J.: Injection Moulding of Plastic Components. MCGRAW-HILL Book Company (UK) Limited, London, 1979.
- [33] BEAUMONT, J.P.; NAGEL, R.; SHERMAN, R.: Successful Injection Molding. Hansen Gardner Publications, 2002. ISBN 1-56990-291-7.
- [34] MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN P.: How to Make Injection Molds. Hanser Garder Publications, 2001. ISBN 1-56990-282-8.
- [35] FISCHER, J.M.: Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage. Plastics Design Library, 2003. ISBN 1-884207-72-3.
- [36] HISEM, P.: Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiku z termoplastu. Disertační práce, TU v Liberci, Liberec, 2003.
- [37] KAZDA, I.: Numerické modelování metodou konečných prvků. Doplnkové studium. ČVUT v Praze, Praha, 1995. ISBN 80-01-01321-9.
- [38] DUBSKÝ, P.: Optimalizace konstrukce a technologie plastového dílu. Diplomová práce. TU v Liberci, Liberec, 2006.
- [39] GABRIEL, J.: Vliv počítačové simulace na ekonomii výroby, kvalitu forem a minimalizaci defektů u vstřikovaných plastových dílů. 1997
- [40] ROSATO, D.V.; ROSATO, M.G.: Injection Molding Handbook. Kluwer Academic Publisher, 200. ISBN 0-7923-8619-1.
- [41] HARPER CH.A.: Modern Plastics Handbook, The McGraw-Hill Companies, 2000. ISBN 0-07-026714-6.
- [42] POTENTE, H.; HEIM, H.P.: Specialized Molding Techniques. Plastic Desing Library, 2001. ISBN 1-884207-91-8.



- [43] VAN DER VEGHT, A.K.: From Polymers to Plastics. DUP Blue Print, 2002. ISBN 9-789071301-86-5
- [44] ČSN EN ISO 294-4: Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění. Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [45] LENFELD P.: Plastics processing. Technická Univerzita v Liberci, Liberec, 2007. ISBN 978-80-7372-282-1
- [46] BIDLAS, V.: Nanokompozity s termoplastickou matricí pro technologii vstřikování. Diplomová práce. TU v Liberci, Liberec, 2005.
- [47] Cadmould – User's Manual. Simcon kunststofftechnische Software GmbH, Germany, 2003.
- [48] <http://www.cadmould.cz/>
- [49] <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=847&mark=>
- [50] <http://www.simcon-worldwide.com/>
- [51] <http://www.engel.at/>
- [52] <http://www.polyone.com/prod/chem/>
- [53] <http://www.chemopetrol.cz/>
- [54] <http://www.galleries.com/>
- [55] [http:// www.prsc.usm.edu/macrog/mpm/composit/nano/](http://www.prsc.usm.edu/macrog/mpm/composit/nano/)

## 8. SEZNAM PUBLIKACÍ

- (1) AUSPERGER, A. – BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P.: The Simulation of mucell foam injection moulding. In: Mezinárodní vědecká konference FS VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2005. ISBN 3-00-01-2510-8
- (2) AUSPERGER, A. - LENFELD, P. – BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P.: Simulace vstřikování a deformace plastového dílu. In: Mezinárodní konference Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005. ISBN 80-227-2264-2
- (3) AUSPERGER, A. - LENFELD, P. – BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P.: Závislost pevnosti ve stříhu polypropylénu na pevnost v tahu a stříhané tloušťce. In: Mezinárodní konference Plastko 2005, Zlín, 2005. ISBN 80-7318-009-X
- (4) BĚHÁLEK, L. - AUSPERGER, A. - WEINLICH, P.: Termooxidační stabilita vstřikovaných dílců. In: Mezinárodní vědecká konference FS VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0902-9
- (5) BĚHÁLEK, L. – AUSPERGER, A. – LENFELD, P. – WEINLICH, P.: The influence of processing conditions on thermo-oxidative ageing of injection moulded polypropylene parts. Mezinárodní konference Technológia 2005, Bratislava, 2005. ISBN 80-227-2264-2
- (6) BĚHÁLEK, L. - AUSPERGER, A. - WEINLICH, P. - LENFELD, P.: Vliv přídavných volumetrických dávkovacích zařízení na probarvení výstřiků z PC. In: Mezinárodní konference Plastko 2005, Zlín, 2005. ISBN 80-7318-009-X
- (7) BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P. - AUSPERGER, A. – LENFELD, P.: Progresivní metody systému Rapid Prototyping při návrhu vstřikovaného dílce z termoplastu. In: Plast Form Service - Plasty konstrukční materiály, Praha, 2005. ISSN 1213-2640
- (8) LENFELD, P. – BIDLAS, V. – AUSPERGER, A. – BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P.: Nanokompozity – ano či ne. In: Plast Form Service - Plasty konstrukční materiály, Praha, 2005. ISSN 1213-2640
- (9) LENFELD, P. – BIDLAS, V. – AUSPERGER, A. – BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P.: Temperature fields in injection tools. In: Mezinárodní konference Plastko 2005, Zlín, 2005. ISBN 80-7318-009-X
- (10) WEINLICH, P. – BĚHÁLEK, L. – AUSPERGER, A.: Tvarová stabilita vstřikovaných dílů. In: Mezinárodní vědecká konference FS VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0902-9
- (11) WEINLICH, P. – BĚHÁLEK, L. – AUSPERGER, A. - LENFELD, P.: Vliv velikosti vyztužujících částic kompozitních systémů na mechanické vlastnosti. In: Mezinárodní konference Plastko 2005, Zlín 2005. ISBN 80-7318-009-X

- (12) WEINLICH, P. – BĚHÁLEK, L. – AUSPERGER, A. - LENFELD, P.: Vliv obsahu plniva na mechanické a reologické vlastnosti PP. XV. In: Mezinárodní vědecké sympozium TU Liberec – TU Dresden, Liberec, 2005. ISBN 80-7083-975-9
- (13) WEINLICH, P. – BĚHÁLEK, L. – LENFELD, P. - AUSPERGER, A.: Možnosti snížení vstřikovacího cyklu. In.: Mezinárodní konference Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005. ISBN 80-227-2264-2
- (14) AUSPERGER, A. -LENFELD, P.-BĚHÁLEK, L.-WEINLICH, P.: Hodnocení přesnosti simulace vakuového tvarování plastů. In: Acta Mechanica Slovaca, PRO-TECH-MA 04, Košice, SR, 2004. ISSN 1335-2393
- (15) AUSPERGER, A. - LENFELD, P. - WEINLICH, P. - BĚHÁLEK, L: Vliv vstupních parametrů na přesnost simulace vakuového tvarování. In: NSVT, Prešov, SR, 2004. ISBN 80-8073-136-5
- (16) AUSPERGER, A. - LENFELD, P. - WEINLICH, P. - BĚHÁLEK, L.: Vliv procenta příměsí recyklovaného materiálu na montážní sílu plastové úchytky. In: 10.mezinárodní konference Vstřikování plastů, Praha, 2004. ISSN 1213-2632
- (17) BĚHÁLEK, L. – LENFELD, P. – WEINLICH, P. – AUSPERGER, A.: Mechanické vlastnosti elastomerů v závislosti na technologických podmínkách vstřikování. In: NSVT, Prešov, SR, 2004. ISBN 80-8073-136-5
- (18) BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P. – LENFELD, P. – AUSPERGER, A.: Nekonenční metody temperování vstřikovacích forem. In: 10. mezinárodní konference Vstřikování plastů, Praha 2004. ISSN 1213-2632
- (19) BĚHÁLEK, L. – WEINLICH, P. – LENFELD, P. – AUSPERGER, A.: Vliv regenerátu na kvalitu a vlastnosti vypěněných polystyrénových desek. In: PRO-TECH-MA 2004, Košice, SR, 2004. ISSN 1335-2393
- (20) LENFELD, P. - AUSPERGER, A. - BĚHÁLEK, L. - WEINLICH, P.: Teplotní analýza vstřikovacích forem. In: NSVT, Prešov, SR, 2004. ISBN 80-8073-136-5
- (21) LENFELD, P. - BĚHÁLEK, L. - AUSPERGER, A. - WEINLICH, P.: Quality control of injection process by means of p-v-T diagram. In: Acta Mechanica Slovaca, PRO-TECH-MA 04, Košice, SR 2004. ISSN 1335-2393
- (22) LENFELD, P. - BĚHÁLEK, L. - AUSPERGER, A. - WEINLICH, P.: Zvyšování kvality vstřikovaných dílů pomocí měření teplotních polí, In: 10.mezinárodní konference Vstřikování plastů, Praha, 2004. ISSN 1213-2632
- (23) WEINLICH, P. - BĚHÁLEK, L. - AUSPERGER, A. - LENFELD, P.: Vliv obsahu talku v polypropylenu na mechanické a reologické vlastnosti, In: NSVT, Prešov, SR, 2005. ISBN 80-8073-136-5
- (24) WEINLICH, P. - BĚHÁLEK, L. - LENFELD, P. - AUSPERGER, A.: Aplikace a vlastnosti termoplastických elastomerů v praxi. In: 10.mezinárodní konference Vstřikování plastů, Praha, 2004. ISSN 1213-2632



- (25) WEINLICH, P. - BĚHÁLEK, L. - LENFELD, P. - AUSPERGER, A.:  
Optimalizace vstřikovací formy změnou konstrukce vtokových a temperačních  
kanálů. In: Acta Mechanica Slovaca, PRO-TECH-MA 04, Košice, SR, 2004. ISSN  
1335-2393
- (26) WEINLICH, P. - LENFELD, P.: Hodnocení reologických vlastností  
termoplastických elastomerů. In: Technológia 2003, Bratislava, SR, 2003. ISBN  
80-227-1935-8
- (27) WEINLICH, P. - LENFELD, P.: Reologie tavenin elastomerů pro technologii  
vstřikování. In: Technológia 2003, Bratislava, SR, 2003. ISBN 80-227-1935-8
- (28) WEINLICH, P. - LENFELD, P.: Evaluation of rheology thermoplastic  
elastomers. In: Technomer 2003, Chemnitz, SRN, 2003. ISBN 3-00-01-2510-8



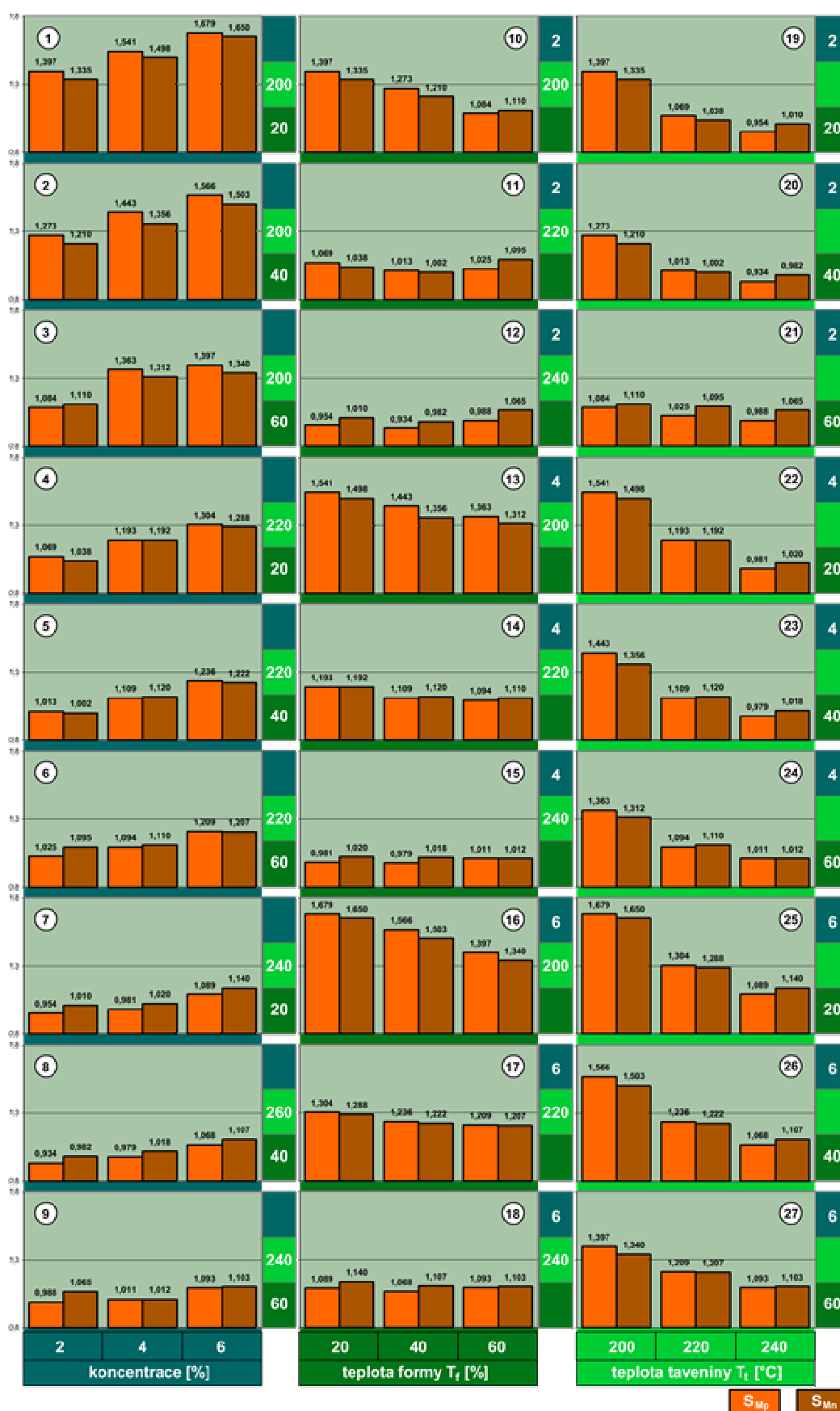


## 9. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1      Grafy výsledků  
Příloha 2      Materiálové listy  
Příloha 3      p-v-T diagramy materiálů

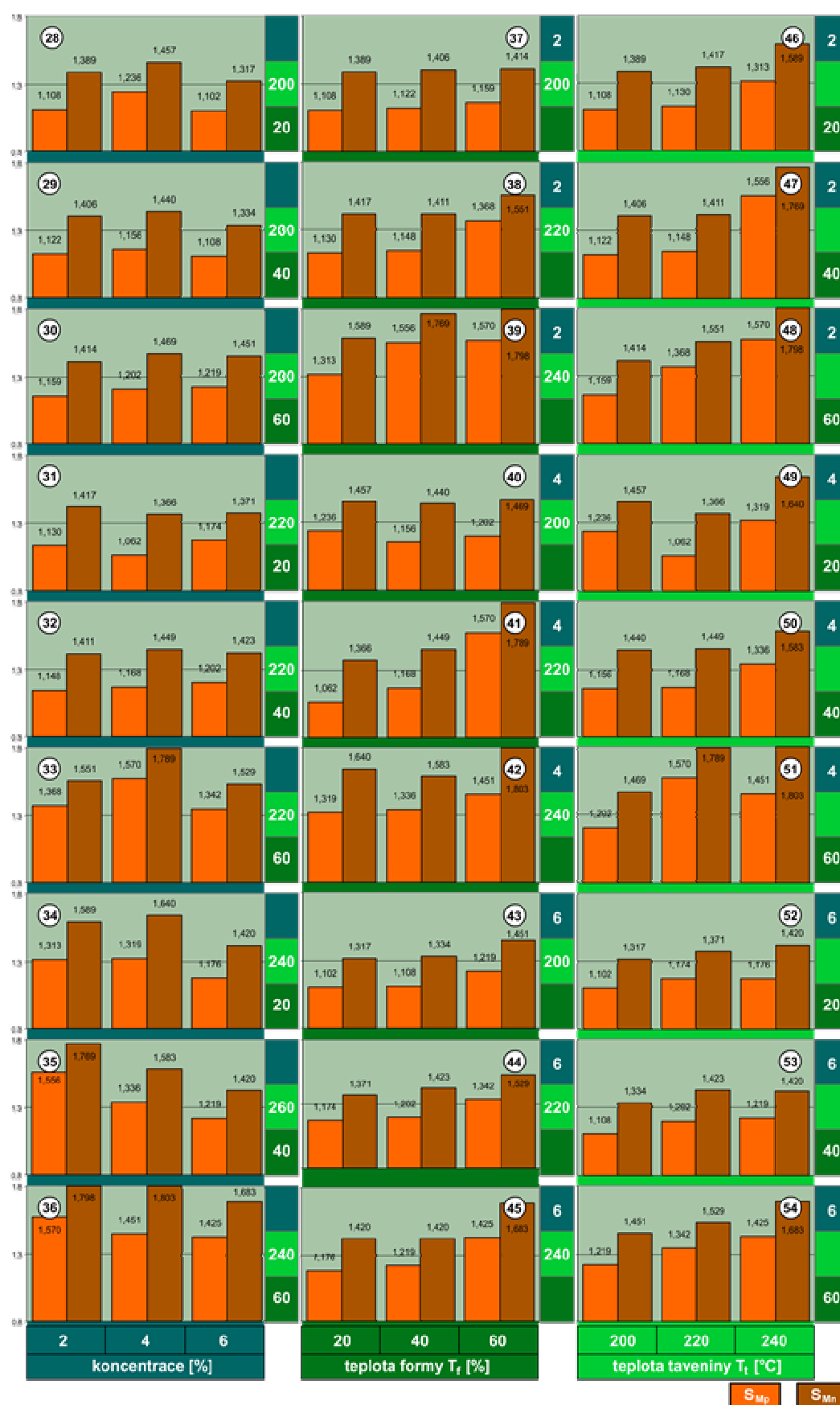


Příloha 1 str. 1/6 Grafy výsledků pro Mosten GB 005 + Nanoblend (2 mm)



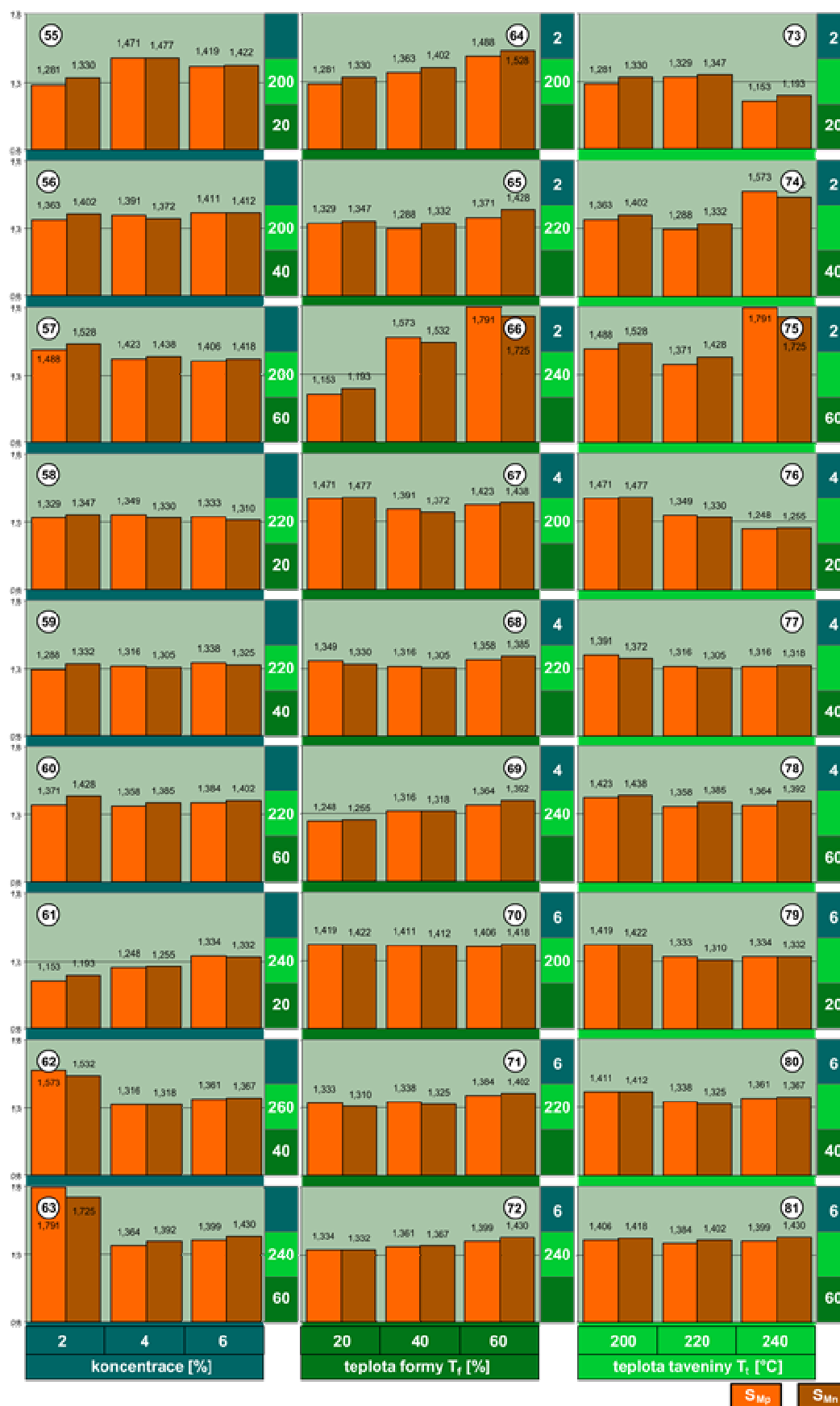


Příloha 1 str. 2/6 Grafy výsledků pro Mosten GB506 + Nanoblend (2 mm)



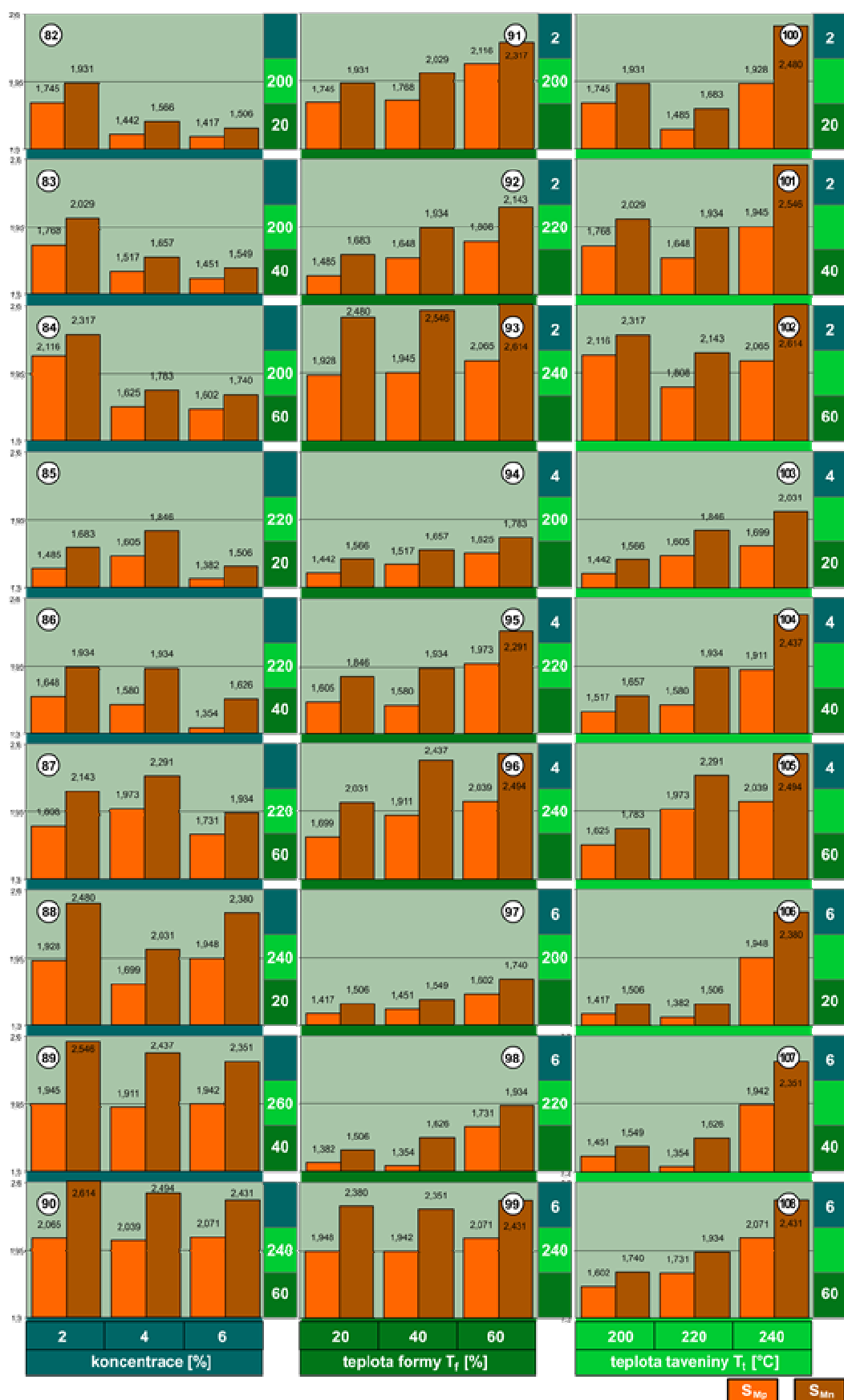


Příloha 1 str. 3/6 Grafy výsledků pro Mosten GB 005 + Nanoblend (4 mm)

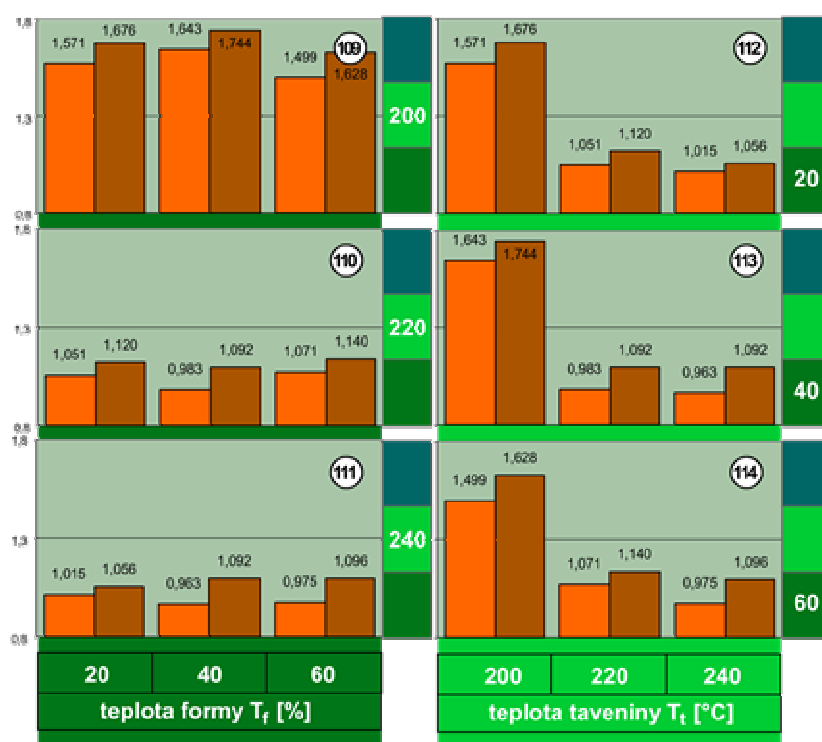




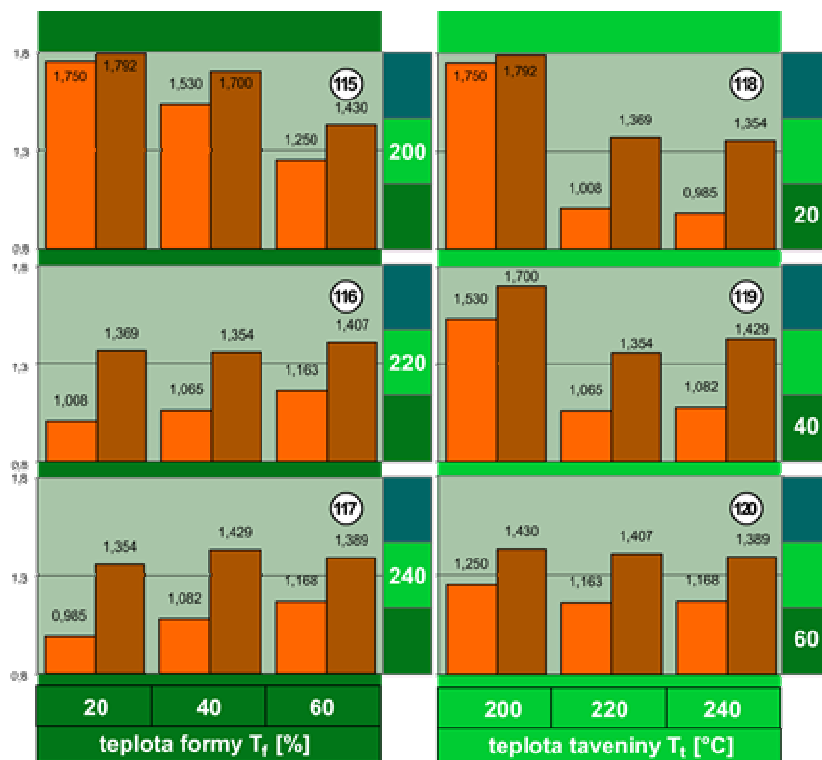
Příloha 1 str. 4/6 Grafy výsledků pro Mosten GB 506 + Nanoblend (4 mm)



Příloha 1 str. 5/6 Grafy výsledků pro Mosten GB005 (2 mm)

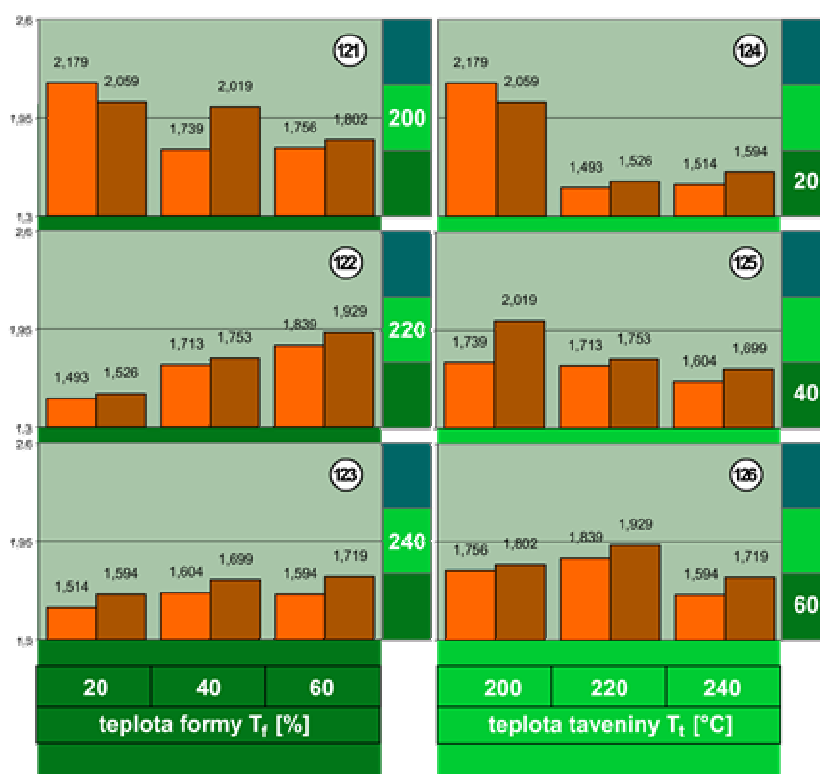


Grafy výsledků pro Mosten GB 506 (2 mm)

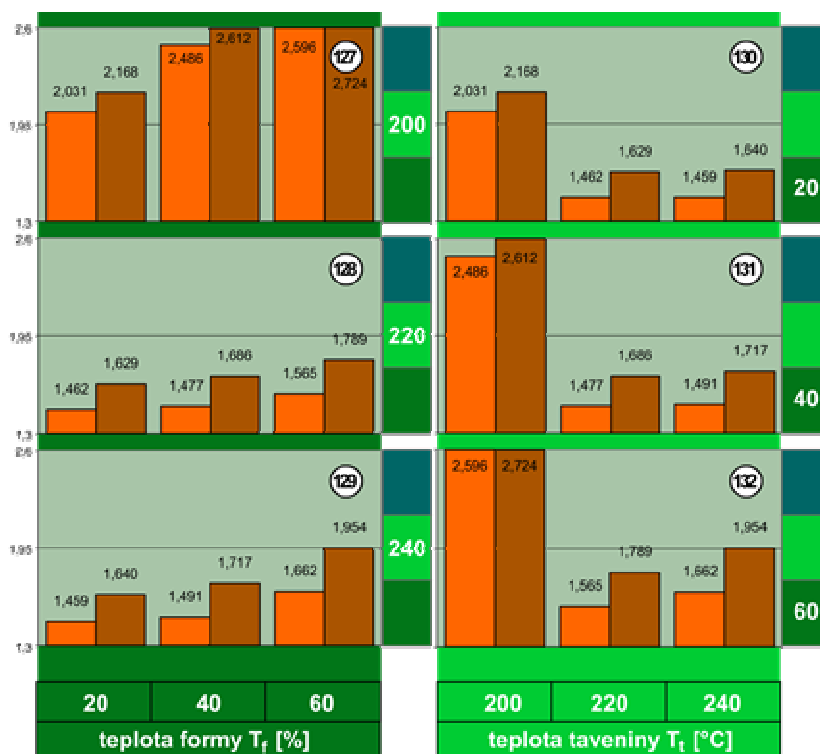




Příloha 1 str. 6/6 Grafy výsledků pro Mosten GB 005 (4 mm)



Grafy výsledků pro Mosten GB 506 (4 mm)



Příloha 2 str. 1/3 Materiálový list Mosten GB 005



**Mosten GB 005**

**Charakteristika**

**Polypropylen Mosten GB 005** je homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností pro víceúčelové použití. Je vhodný pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazů, motouzů a k výrobě fólií pro následné tvarování.

**Typické vlastnosti a použití**

VLASTNOST	JEDNOTKA	TYPICKÁ HODNOTA	ZKUŠEBNÍ METODA
INDEX TOKU TAVENINY (230/ 2,16 )	g/10 min	5	ISO 1133
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	MPa	35	ISO 527
CELKOVÁ TAŽNOST	%	>100	ISO 527
OHYBOVÝ MODUL	MPa	1600	ISO 178
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	4	ISO 179
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY -20°C	kJ/m <sup>2</sup>	-	ISO 179
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	°C	157	ISO 306
HDT (1,8 MPa)	°C	57	ISO 75

**Poznámka:**

Data obsažená v tabulce představují typické hodnoty jednotlivých vlastností. Jedná se o údaje informativního charakteru, tj. netvoří meze specifikací daného typu.





## Příloha 2 st. 2/3 Materiálový list Mosten GB 506



### Mosten GB 506

#### Charakteristika

**Polypropylen Mosten GB 506** je blokový kopolymer určený pro vstřikování technických dílů a součástí s nároky na vysokou houževnatost. Je vhodný rovněž pro výrobu koextrudovaných fólií určených pro tvarování.

Může být použit jako matrice pro výrobu nejrůznějších kompaundů zejména pro potřeby automobilového průmyslu.

#### Typické vlastnosti a použití

VLASTNOST	JEDNOTKA	TYPICKÁ HODNOTA	ZKUŠEBNÍ METODA
INDEX TOKU TAVENINY (230/ 2,16 )	g/10 min	6	ISO 1133
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	MPa	30	ISO 527
CELKOVÁ TAŽNOST	%	60	ISO 527
OHYBOVÝ MODUL	MPa	1600	ISO 178
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	10	ISO 179
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY -20°C	kJ/m <sup>2</sup>	4,5	ISO 179
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	°C	155	ISO 306
HDT (1,8 MPa)	°C	58	ISO 75

#### Poznámka:

Data obsažená v tabulce představují typické hodnoty jednotlivých vlastností. Jedná se o údaje informativního charakteru, tj. netvoří meze specifikací daného typu.

Příloha 2 st. 3/3 Materiálový list Nanoblend 1201

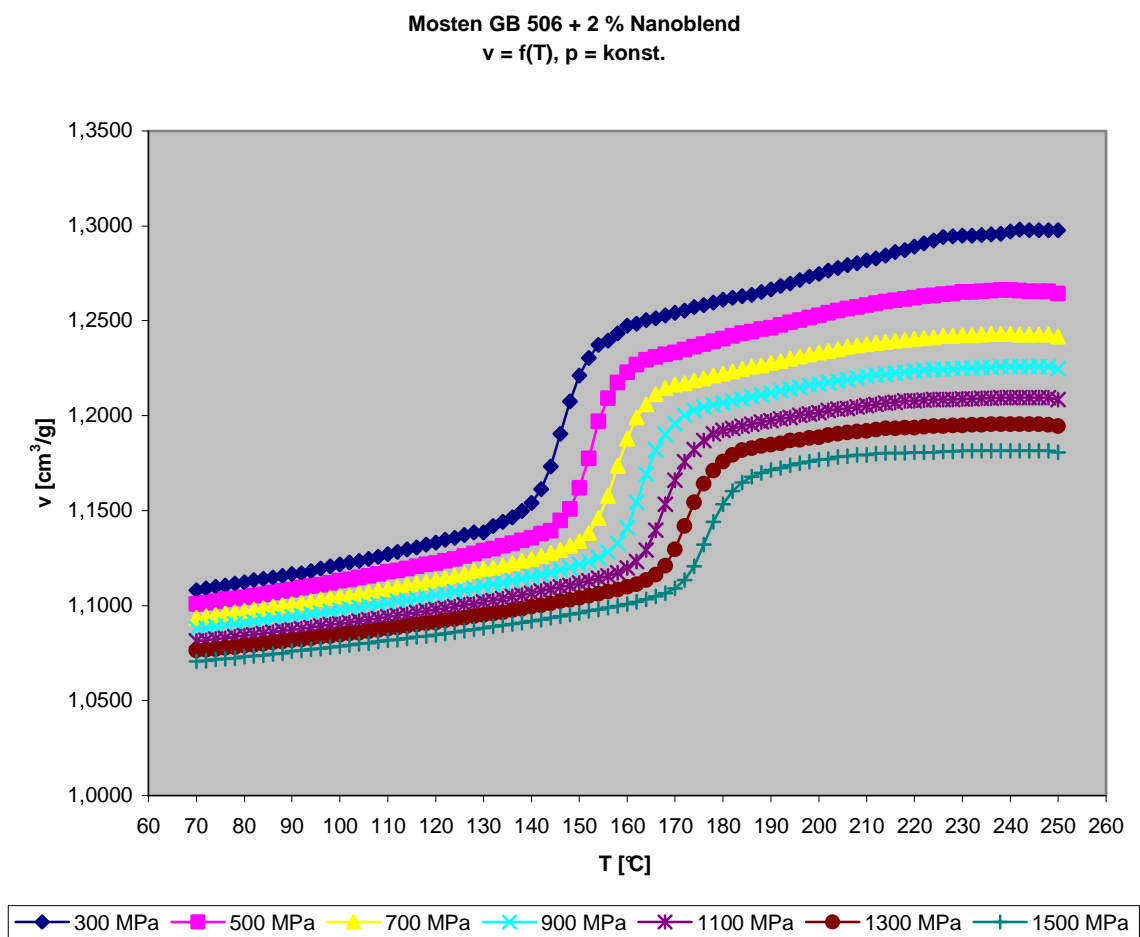


## Nanoblend 1201

Typické vlastnosti

VLASTNOSTI	JEDNOTKA	TYPICKÁ HODNOTA	ZKUŠEBNÍ NORMA ASTM
HUSTOTA	[kg.m <sup>-3</sup> ]	910	D792
MFR	[g/10min]	20,4	D1238
TVRDOST SHORE D – 15 s.	[-]	54	D2240
MEZ PEVNOSTI V TAHU	[MPa]	18	D638
MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	[MPa]	1151	D638
MEZ PEVNOSTI V OHYBU	[MPa]	27	D790
MODUL PRUŽNOSTI V OHYBU	[MPa]	965	D791
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST IZOD	[J.m <sup>-1</sup> ]	645	D256

Příloha 3 str. 1/2 p-v-T diagram materiálu Mosten GB 506 + 2 % Nanoblend



Příloha 3 str. 2/2 p-v-T diagram materiálu Mosten GB 506 + 4 % Nanoblend

